



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

담수호 수질 관리를 위한
SWAT-EFDC 모형 기반
동적 회복탄력성 평가

Dynamic Resilience Assessment for Water
Quality Management of Estuarine Reservoir
using SWAT-EFDC model

2020년 2월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템공학부
지역시스템공학전공
황 순 호

담수호 수질 관리를 위한 SWAT-EFDC 모형 기반 동적 회복탄력성 평가

Dynamic Resilience Assessment for Water Quality Management
of Estuarine Reservoir using SWAT-EFDC model

지도교수 강 문 성

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2020년 2월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템공학부
지역시스템공학전공
황 순 호

황순호의 공학박사 학위논문을 인준함

2020년 2월

위 원 장 _____ (인)

부 위 원 장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

담수호 수질 관리를 위한 SWAT-EFDC 모형 기반 동적 회복탄력성 평가

우리나라 하구에 조성된 담수호의 수자원은 다양한 용수 목적에 맞게 활용하고 있으며, 수질 기준에 부합하는 용수를 공급하고 담수호 및 간척지의 친환경적 가치를 높이기 위해서는 담수호의 상류 유역 및 유입 오염물질, 그리고 담수호 수체 특성에 대한 종합적인 이해를 기반으로 수질 오염 관리 대책을 수립하는 것이 중요하다.

일반적으로 담수호 개선을 위한 방안의 선정 방식은 연평균 수질 농도를 기준으로 목표하고자 하는 수질 기준의 만족 여부에 대한 평가와 경제적 평가를 함께 고려하여 최적의사결정 기반으로 주로 이루어져 왔다. 그러나 기존의 평가 방법에서는 목표 수질의 만족 여부가 중요하다는 점에서 담수호 수자원의 시기별 활용성에 대한 고려를 간과하기 쉽다. 또한 담수호 수자원 시스템의 수질 악화에 대한 회복탄력성을 높이는 일은 단순히 유역관리대책의 적용에 따른 수질 개선 문제와는 별도로 담수호 수자원 시스템의 지속가능성과 연관된다는 점에서 기존의 평가 방식을 보완하기 위한 수단이 필요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 담수호 수자원 관리 방안을 평가하는 데 있어서 회복탄력성의 개념을 활용하였으며, 각 방안에 대한 시간적 변화에 따른 담수호의 회복탄력성 특징을 고려하기 위하여 동적 회복탄력성 개념 및 평가 방법을 도입하였다.

본 연구에서는 우선 기존의 수질 평가 방법에 따라 간월호를 대상으로 수질 개선 방안별 수질 변화를 SWAT-EFDC 연계모형을 통해 모의하고, 연평균 수질 농도와 총인 삭감량에 대해 분석하였다. 분석 결과, 간월호의 지형학적 특성에 따라 간월호 상류 구간의 수질 농도가 다른 구간에 비해 높게 나타났으며, 상류 구역의 경우 준설 시나리오만으로는

목표 수질을 달성하기 어려운 것으로 나타났다. 따라서, 상류 구역의 수질 목표 달성을 위해서는 준설 시나리오만으로는 한계가 있으므로 상류 유역 출구부에 위치한 하수처리시설의 총인 배출부하량을 삭감과 추가적인 유역 수질 관리 대책이 필요하다.

상류 구역에 담수호의 준설 시나리오만을 적용한 경우, 목표 수질을 달성하지는 못하였지만 저수지의 준설은 내부부하량을 저감하고, 수질 악화에 반응하는 내적 요인이라는 점에서 담수호 시스템의 회복탄력성과 밀접하게 관련이 있다. 따라서 본 연구에서는 담수호 준설 시나리오에 따른 동적 회복탄력성을 분석하였으며, 시간 및 경제적 효율성을 위해 담수호 준설을 60%-80% 범위에서 실시하는 것을 제안하였다. 또한 선제적 대안인 준설 시나리오 뿐만 아니라 적응형 대안인 하수처리장 방류수 저감 시나리오를 구성하여, 수질이 악화되는 시기에 하수처리장 운영을 통한 방류 부하량 저감 시나리오를 추가적으로 검토하였다. 분석 결과, 선제적 대응만을 적용한 경우에 비하여 회복탄력성을 상당히 높일 수 있는 것으로 나타나 자원효율성 지표의 경우, 상대적으로 낮게 나타나 수질 개선 방안 수립시에 하수처리장의 효율적 운영이 추가적으로 고려될 필요가 있다.

본 연구에서 검토한 동적 회복탄력성 분석 방법을 통해 기존의 목표 수질 달성 여부나 정적 회복탄력성 분석에서는 담기 어려운 결론을 도출할 수 있었으며, 이는 동적 회복탄력성 분석의 효용성을 확인할 수 있는 부분이다. 본 연구에서 제안한 담수호의 동적 회복탄력성 분석 방법은 추후 담수호 수질 개선 평가를 위한 추가적인 방안으로 검토될 수 있을 뿐만 아니라, 본 연구의 결과는 담수호의 회복탄력성을 높여 지속가능한 수자원 관리 시스템을 구축하기 위한 연구 사례로 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 담수호, 수질관리, 수문모형, 호소모형, 회복탄력성, 동적 회복탄력성
학 번 : 2012-31000

목 차

초 록	i
목 차	iii
List of Tables	vii
List of Figures	ix
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적	4
1.3 연구 내용 및 범위	4
제 2 장 연구사	5
2.1 호소 수질개선 방안 평가	5
2.2 회복탄력성	7
2.2.1 회복탄력성의 정의	7
2.2.2 정적 회복탄력성과 동적 회복탄력성	11
2.3 유역 및 3차원 수치 모형 기반 유역-호소 수질 모의	12
제 3 장 회복탄력성 기반 담수호 수질 관리 방안 평가	16
3.1 동적회복탄력성 기반 수질 관리 방안 평가	16
3.1.1 담수호 수자원의 회복탄력성 정의	18
3.1.2 담수호 수자원의 회복탄력성 평가	20
3.2 담수호 특징 및 수질 관리 대책	27
3.3 유역-호소 연계모형 기반 모델링 시스템 구축	30
3.3.1 유역-호소 연계 모형의 구성	30

3.3.2 SWAT 모형	32
3.3.3 EFDC 모형	37
제 4 장 대상 유역 및 입력 자료 구축	43
4.1 대상 담수호 및 유역 특성	43
4.1.1 대상 담수호 및 유역 개요	43
4.1.2 대상 유역 현황	44
4.2 기상	48
4.3 유역 수문·수질 및 오염원	50
4.3.1 수문	50
4.3.2 수질	52
4.3.3 오염원	55
4.4 담수호 수위 및 수질 자료	59
4.4.1 담수호 수위 모의를 위한 자료 구축	59
4.4.2 담수호 수질 모의를 위한 자료 구축	61
제 5 장 SWAT-EFDC 연계모형을 이용한 담수호 유역 수문 해석	71
5.1 SWAT 모형을 이용한 담수호 유역 수문·수질 모의	71
5.1.1 SWAT 모형을 이용한 유출량 모의 및 보·검정	73
5.1.2 SWAT 모형을 이용한 수질 모의 및 보·검정	85
5.1.3 수질모델링을 통한 유역 기여율 평가	90
5.2 EFDC 모형을 이용한 담수호 수위·수질 모의	91
5.2.1 EFDC 모형을 이용한 수위 모의 및 보·검정	91
5.2.2 EFDC 모형을 이용한 수질 모의 및 보·검정	95
제 6 장 동적회복탄력성 기반 담수호 수질 관리 방안 평가	102
6.1 수질 관리 방안 시나리오 구성	102
6.2 시나리오별 담수호 수질 모의 결과 분석	105

6.2.1 담수호 구간별 수질 모의 결과	105
6.2.2 담수호 구간별 총인 저감 효율 분석 결과	122
6.3 시나리오별 동적 회복탄력성 분석	125
6.3.1 준설 시나리오별 동적 회복탄력성 분석	126
6.3.2 하수처리장 운영에 따른 동적 회복탄력성 분석	136
6.3.3 시나리오별 정적 및 동적 회복탄력성 비교	138
 제 7 장 요약 및 결론	139
 참 고 문 헌	143
Abstract	153

List of Tables

Table 2.1. Application of resilience concept in hydrology and water resources problem	9
Table 2.2. Application of resilience concept in hydrology and water resources problem (cont.)	10
Table 2.3. Comparison of SWAT, SWMM, and HSPF model (환경부, 2007)	14
Table 2.4. Comparison of SWAT and HSPF model (국립환경과학원, 2014)	15
Table 3.1. Various practices for managing water quality of estuarine reservoir (or reservoir) in South Korea	29
Table 4.1. Characteristics of the streams in Ganwol estuarine reservoir watershed	47
Table 4.2. Soil characteristics	63
Table 4.3. Details of the column-leaching test	64
Table 4.4. Column test results	67
Table 5.1. Weather data type and source for SWAT model	73
Table 5.2. Method options for calculating each variable in SWAT model ...	74
Table 5.3. List of calibration parameters for daily runoff simulation for the Chungji watershed	77
Table 5.4. List of calibration parameters for daily runoff simulation for the Dodang watershed	79
Table 5.5. List of calibration parameters for daily runoff simulation for the Waryong watershed	81
Table 5.6. List of calibration parameters for daily runoff simulation for the Dundang watershed	83
Table 5.7. Grid cells in EFDC model	91
Table 5.8. Water balance analysis results	94
Table 5.9. List of calibrated parameters in EFDC model	96

Table 5.10. Calibration result	97
Table 6.1. Description of the applied scenario	103
Table 6.2. Annual average T-P concentration and reduction efficiency	123
Table 6.3. Resilience analysis result by scenario	138

List of Figures

Fig. 2.1. Flow chart of planning reservoir water management	6
Fig. 3.1. Flowchart of establishing water quality management plan based on dynamic resilience analysis in estuarine reservoir	17
Fig. 3.2. Generic bathtub curve of system resilience	18
Fig. 3.3. Water quality changes with proactive or reactive measure	19
Fig. 3.4. Generic diagram of estimating total resilience loss	21
Fig. 3.5. Generic diagram of reservoir system resilience (adapted from Simonovic and Arunkumar, 2016)	24
Fig. 3.6. Diagram of SWAT–EFDC linkage for simulating water quality in estuarine reservoir	31
Fig. 3.7. Diagram of hydrology and water quality simulation in SWAT model (adpated from Neitsch et al., 2005)	33
Fig. 3.8. Diagram of relationships of water flow component in SWAT model (adapted from Neitsch et al., 2011)	35
Fig. 3.9. Generic schematic of Muskingum method (adapted from Neitsch et al., 2011)	36
Fig. 3.10. Relationships between simulation component in EFDC model (adapted from Craig, 2009)	38
Fig. 3.11. Relationship of EFDC model parameters (adapted from Craig, 2009)	42
Fig. 4.1. Location of the Ganwol estuarine reservoir	43
Fig. 4.2. Digital elevation model of the Ganwol estuarine reservoir watershed	44
Fig. 4.3. Soil map of the Ganwol estuarine reservoir watershed	45
Fig. 4.4. Landuse map of the Ganwol estuarine reservoir watershed	46
Fig. 4.5. Thiessen polygon analysis and location of Seosan weather station	48
Fig. 4.6. Yearly mean weather data	49
Fig. 4.7. Observed points of stream discharge and water quality	50
Fig. 4.8. Stream runoff data to the Ganwol estuarine reservoir	51

Fig. 4.9. Total nitrogen (T-N) concentration of inflow streams	52
Fig. 4.10. Total phosphorus (T-P) concentration of inflow streams	53
Fig. 4.11. Suspended Solids (SS) concentration of inflow streams	54
Fig. 4.12. Locations of public owned treatment utilities	55
Fig. 4.13. Total nitrogen (T-N) concentration	56
Fig. 4.14. Total phosphorus (T-P) concentration	56
Fig. 4.15. Suspended Solids (SS) concentration	56
Fig. 4.16. Application status of liquid manure on the west side paddy fields of Ganwol estuarine reservoir	57
Fig. 4.17. Application status of liquid manure on paddy fields	58
Fig. 4.18. Agricultural activity and fertilizing schedule	58
Fig. 4.19. Irrigation water pump stations in Ganwol watershed	60
Fig. 4.20. Locations of monitoring points on Ganwol estuarine reservoir	61
Fig. 4.21. Total nitrogen (T-N) concentration	62
Fig. 4.22. Total phosphorus (T-P) concentration	62
Fig. 4.23. Diagram of the column-leaching test	65
Fig. 4.24. Column test results (test#1)	68
Fig. 4.25. Column test results (test#2)	69
Fig. 4.26. Column test results (test#3)	70
Fig. 5.1. Spatial distribution of subbasin, treatment utilities and observed point (runoff and water quality)	72
Fig. 5.2. Observed point of runoff and water quality data	76
Fig. 5.3. Schematic of 1:1 line of observed and simulated runoff (CJ)	77
Fig. 5.4. Schematic of observed and simulated time series runoff (CJ)	78
Fig. 5.5. Schematic of 1:1 line of observed and simulated runoff (DD)	79
Fig. 5.6. Schematic of observed and simulated time series runoff (DD)	80
Fig. 5.7. Schematic of 1:1 line of observed and simulated runoff (WA)	81
Fig. 5.8. Schematic of observed and simulated time series runoff (WA) ...	82

Fig. 5.9. Schematic of 1:1 line of observed and simulated runoff (Dun) ···	83
Fig. 5.10. Schematic of observed and simulated time series runoff (Dun) ·	84
Fig. 5.11. Schematic of observed and simulated time series runoff (CJ) ···	86
Fig. 5.12. Schematic of observed and simulated time series runoff (DD) ··	87
Fig. 5.13. Schematic of observed and simulated time series runoff (WA) ·	88
Fig. 5.14. Schematic of observed and simulated time series runoff (Dun) ·	89
Fig. 5.15. Discharged T-P pollution contribution of each subbasin to Ganwol watershed ···········	90
Fig. 5.16. Bottom elevation of Ganwol estuarine reservoir in EFDC model	91
Fig. 5.17. Observed and simulated water level elevation of Ganwol estuarine reservoir ···········	92
Fig. 5.18. Water level elevation changes of Ganwol estuarine reservoir ···	93
Fig. 5.19. GW2 point calibration results ···········	98
Fig. 5.20. GW3 point calibration results ···········	99
Fig. 5.21. T-N concentration changes with time series ···········	100
Fig. 5.22. T-P concentration changes with time series ···········	101
Fig. 6.1. Dredging operation scenario ···········	104
Fig. 6.2. T-P discharge reduction scenario ···········	104
Fig. 6.3. Simulated results of T-P concentration (Zone 3, S0, S1-S4)	106
Fig. 6.4. Simulated results of T-P concentration (Zone 3, S0, S3, S5-S6)	108
Fig. 6.5. Simulated results of T-P concentration (Zone 3, S0, S4, S7-S8)	109
Fig. 6.6. Simulated results of T-P concentration (Zone 3, S0, S9-S10)	111
Fig. 6.7. Simulated results of T-P concentration (Zone 3, S0, S11-S14)	113
Fig. 6.8. Simulated results of T-P concentration (Zone 2, S0, S1-S4) ··	115
Fig. 6.9. T-P Simulated results (Zone 2, S0, S5-S8) ···········	117
Fig. 6.10. T-P Simulated results (Zone 2, S0, S9-S10) ···········	119
Fig. 6.11. T-P Simulated results (Zone 2, S0, S11-S14) ···········	121
Fig. 6.12. T-P reduction efficiency results (S0, S11-S14) ···········	124

Fig. 6.13. T-P concentration change in estuarine reservoir (S0, S1-S4)	127
Fig. 6.14. T-P concentration change in estuarine reservoir (S0)	128
Fig. 6.15. T-P concentration change in estuarine reservoir (S3)	129
Fig. 6.16. T-P concentration change in estuarine reservoir (S4)	129
Fig. 6.17. Resilience loss (S0)	130
Fig. 6.18. Resilience loss (S3)	131
Fig. 6.19. Resilience loss (S4)	131
Fig. 6.20. Resilience analysis (S0)	133
Fig. 6.21. Resilience analysis (S3)	134
Fig. 6.22. Resilience analysis (S4)	135
Fig. 6.23. Resilience analysis (adaptive scenario)	137

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

하구 (estuary, 河口)는 하천의 최종 유출부가 해양 환경과 만나는 지점을 말하며, 담수와 해수의 혼합이 이루어지는 수역으로, 생산적인 생태계 환경 (productive ecosystems)을 제공하거나 하구 유입 유출량에 대한 자연적인 필터 (natural filter for runoff) 역할을 하기도 한다 (NOAA, 2019). 또한 하구에 방조제 건설을 통해 해양 순환을 인위적으로 막고 폐쇄성 수환경인 담수호 (estuarine reservoir)를 조성함으로써, 다양한 용수 공급 기능을 하며 일부 지역에서는 담수화된 수자원을 농업 용수로 활용하고 있다 (윤춘경과 함종화, 2000; 이형주, 2001; 노재경 외, 2013; 장정렬 등, 2014).

우리나라의 담수호는 주로 서해에 위치하며 대표적으로 시화호, 화성호, 아산호, 삽교호, 천수만 그리고 새만금 등이 있고, 이들 대부분의 담수호는 수질 문제를 겪고 있다. 천수만의 경우, 간척공사 이후 조류 속도 감소로 인한 퇴적물 세립화 (송운호 등, 2011; 이동관, 2016), 점오염원으로서 축산폐수 및 생활하수의 유입과 비점오염원으로서 농경지 유출수 유입 (임경호 등, 2006; 김종구와 장효상, 2014; 이동관 등, 2016)으로 인해 세립질 퇴적물의 재부유로 인한 호내 유기물과 영양염의 재공급 (박홍식 등, 2000) 및 인의 내부부하량 증가 (송민경, 2007)로 이어지고 있다. 각 담수호의 수질 문제는 간척지에서의 고품질의 친환경 농산물 생산 (이광야 등, 2008) 및 다양한 토지이용 개발 (최경숙과 이광야, 2012)을 위해서 중요한 요소이며, 이를 개선하기 위하여 상류 유역과 호내 대책 및 수질 개선을 위한 관련 법 제정 등 많은 노력을 기울이고 있다. 특히, 담수호의 여러 요소 중 수질 문제는 간척지에서의 고품질의 친환경 농산물 생산 (이광야 등, 2008) 및 다양한 토지이용 개발 (최경숙 외,

2012)을 위해서 중요한 요소이며, 담수호의 수질을 관리하기 위해 정부 및 지자체에서 각 담수호의 목적에 맞게 상류 및 호내 대책 혹은 수질 관리를 위한 법 제정 등 많은 노력을 기울이고 있다. 하지만 폐쇄성 수 환경으로 조성된 담수호의 경우, 다양한 수질 오염 문제에 대하여 회복 탄력성 (resilience)¹⁾이 낮아지게 된다. 특히, 하구담수호의 경우 유역의 최하류에 위치하여 상류 유역의 오염 물질이 지속적으로 유입할 경우 취약성 (vulnerability)²⁾도 함께 높아지게 된다. 이러한 이유로 우리나라의 여러 담수호는 수질 문제의 해결에 어려움을 겪고 있다. 따라서 농업용수 수질 기준에 부합하는 관개용수를 공급하고, 담수호 및 간척지의 친환경적 가치를 높이기 위해서는 담수호의 상류 유역 및 유입 오염물질, 그리고 담수호 수체 특성에 대한 종합적인 이해를 기반으로 수질오염 관리 대책을 수립하는 것이 중요하다.

수자원 문제를 해결하기 위한 과정으로 크게 계획 (planning)과 관리 (management) 단계로 나눌 수 있는데 (심명필, 2001a; 강노을, 2012), 수자원 관리에 있어서 시스템은 서비스 실패 주기를 최소화해야 할 뿐만 아니라 외부 변화에 대해 더욱 지속가능하고 회복탄력적이어야 한다 (Butler et al., 2014). 즉, 수자원 시스템의 회복탄력성을 높이기 위한 시스템 설계는 수자원 시스템의 실패를 유발하는 외부적인 조건이 주어진 경우, 그 실패를 최대한 빠르게 회복할 수 있음을 의미한다. 담수호의 경우 수질이 악화될 경우 수질이 기준에 만족하는 순간으로 도달하는 시간이 빠를수록 담수호의 다양한 목적을 위한 용수이용 가능성이 높아지게 되고, 담수호의 수자원적 기능의 효율성을 극대화 할 수 있을 것이다.

-
- 1) 일반적으로 회복탄력성 (resilience)이란 시스템에 실패 (failure)가 발생할 경우, 회복 (recovery)하는 능력 (ability)과 속도 (speed)를 일컫는다 (Holling, 1973; Hashimoto et al., 1982; Loucks 1997; Kjeldsen and Rosbjerg 2004; Vurgin et al., 2010; 박진헌 등, 2018).
 - 2) 취약성 (vulnerability)이란 일반적으로 시스템에 실패가 발생할 경우, 그 실패의 정도 (magnitude)를 일컬으며 (Hashimoto et al., 1982; 남원호, 2013; 강두선 등, 2013; 박지훈, 2016), 취약도는 실패가 발생할 때마다 산정되는 실패의 정도 중에서 가장 실패한 정도를 의미한다 (강두선 등, 2013).

기존 담수호의 수자원관리, 그 중에서 특히 수질 관리를 한 방안들을 검토하고 의사결정을 수행하는 과정은 주로 최적의사결정 (optimal decision making) 방식을 기반으로 하고 있으며, 연구자가 정하는 특정한 조건 하에서 최적인자 (optimal criteria) 혹은 수질 기준을 만족하기 위한 방안들의 조합을 결정하는 방식이었다. 즉, 기존의 담수호 수자원 관리 방안을 평가하는 방법은 연평균 수질이 목표 수질에 만족하느냐를 묻는 수준에 그치고 있고, 이는 담수호 수자원 이용 목적별 시기 혹은 담수호 수질이 급격히 악화되는 시기 등에 대한 평가를 수반하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 하지만 담수호의 수질 관리를 위한 유역 및 호소 대책은 수질 회복의 중요성은 연중에서도 시기에 따라 달라지며, 수질의 악화로부터 회복은 시간의 함수 ($f(t)$) 일 수 밖에 없고, 이를 공학적으로 분석하기 위한 방법론이 필요하다. 따라서 담수호의 수질 및 수자원의 효율적인 관리를 위해서는 기존의 수질 기준 만족 여부에 대한 평가뿐만 아니라, 담수호 수질 악화 시에 시스템이 회복하는 기간과 정도를 기반으로 시스템의 능력을 평가하는 회복탄력성 (resilience)의 개념을 담수호의 수질 관리 문제에 도입하여 해석할 필요가 있다.

회복탄력성 분석의 경우, 크게 정적회복탄력성 분석과 동적회복탄력성 분석으로 나눌 수 있다. 정적회복탄력성 분석의 경우, 회복손실량의 총합 지표와 더불어, Hashimoto et al. (1982)가 회복탄력성 (resiliency)을 신뢰성 (reliability), 강건성 (robustness) 그리고 취약성 (vulnerability) 지표들과 함께 통계적 해석을 통해 제안한 이래로 많은 연구자들이 이를 차용해 다양한 연구 분야에 적용해 왔으나, 기존의 정적 회복탄력성은 담수호의 시간에 따른 수질 회복 능력을 충분히 표현하기가 어려우므로, 이를 보완하기 위한 동적 회복탄력성 분석 방법이 필요하다.

1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 담수호 수자원의 효율적 활용을 위한 회복탄력성의 정량적인 평가를 위해, 담수호 수자원 시스템에서의 회복탄력성을 새롭게 정의하고 적용하는 것이다. 특히, 담수호 수자원의 효율적 활용을 위해서는 시간별 회복탄력성의 변화를 분석하는 것이 중요하며, 본 연구에서는 수질 개선 방안별 담수호의 동적 회복탄력성을 분석하고, 적용성을 평가하는 것이 세부적인 목적이라 할 수 있다.

1.3 연구 내용 및 범위

본 연구의 공간적 범위는 서해안에 위치한 담수호인 간월호를 대상으로 하며, 간월호는 최근 수질 악화에 따라 다목적 용수 및 주변부 농경지에 농업 용수 공급에 어려움을 겪고 있다. 특히, 간월호의 경우, 인의 내부부하 문제가 지속적으로 지적된 바 있으므로 본 연구에서는 분석 대상 수질 항목을 총인 (Total Phosphate, T-P)으로 하였다.

본 연구에서는 담수호의 다양한 수질 관리 방안을 모의하기 위하여, 대표적인 유역모형과 호소모형이라 할 수 있는 SWAT-EFDC 모형을 연계한 시스템을 구성하였다. 또한 유역-호소 모형 연계모형을 기반으로 도출한 수자원 환경 및 수질의 시계열적 변화 모의를 통해 수질 개선 효과 및 회복탄력성 분석을 수행하다. 특히, 회복탄력성 분석에 있어서 정적회복탄력성과 동적회복탄력성의 비교를 통해 담수호 수자원 관리를 위한 동적회복탄력성 적용성 평가에 중점을 두었다.

제 2 장 연구사

2.1 호소 수질개선 방안 평가

일반적으로 호소에서의 수질 개선을 위한 방안을 검토하는 절차는 Fig. 2.1과 같이 문제를 정의하고, 시나리오를 구성하여 모델링을 통해 방안별 수질 모의 결과를 평가하여 왔다. 또한 기존에 수질 개선을 평가하는데 있어 단순히 특정 시기(a) 혹은 목표 시기(b)나 목표 유량(c)에 맞춰 목표 수질 달성 여부를 장래 예측 년도 (b 혹은 c)의 평균값 (혹은 모의 기간(a) 동안의 평균값)으로 평가해왔다 (윤춘경과 함종화, 2000; 오희상과 이한필, 2018; 최선화 등, 2019, Chen et al., 2019). 하지만, 기존의 평가 방식은 단순히 연평균 수질 농가 목표 수질 기준 (criteria)을 만족하는 가에 대한 평가에 그치고 있기 때문에, 담수호 수질의 시기별 중요성을 간과하기 쉽다. 예를 들어, 수질이 악화되는 시점으로부터 수질 기준을 만족하는 시점까지 회복하는 정도가 빠를수록 담수호 수자원의 활용 가능성이 높아지고, 심지어 담수호의 활용 시기에 따라 수질 만족여부의 중요도가 달라질 수 있다. 따라서 이를 보완하기 위한 분석 도구가 필요하다고 할 수 있으며, 본 연구에서는 회복탄력성 기반으로 수질 개선을 위한 방안을 평가하는 절차를 고려하였다.

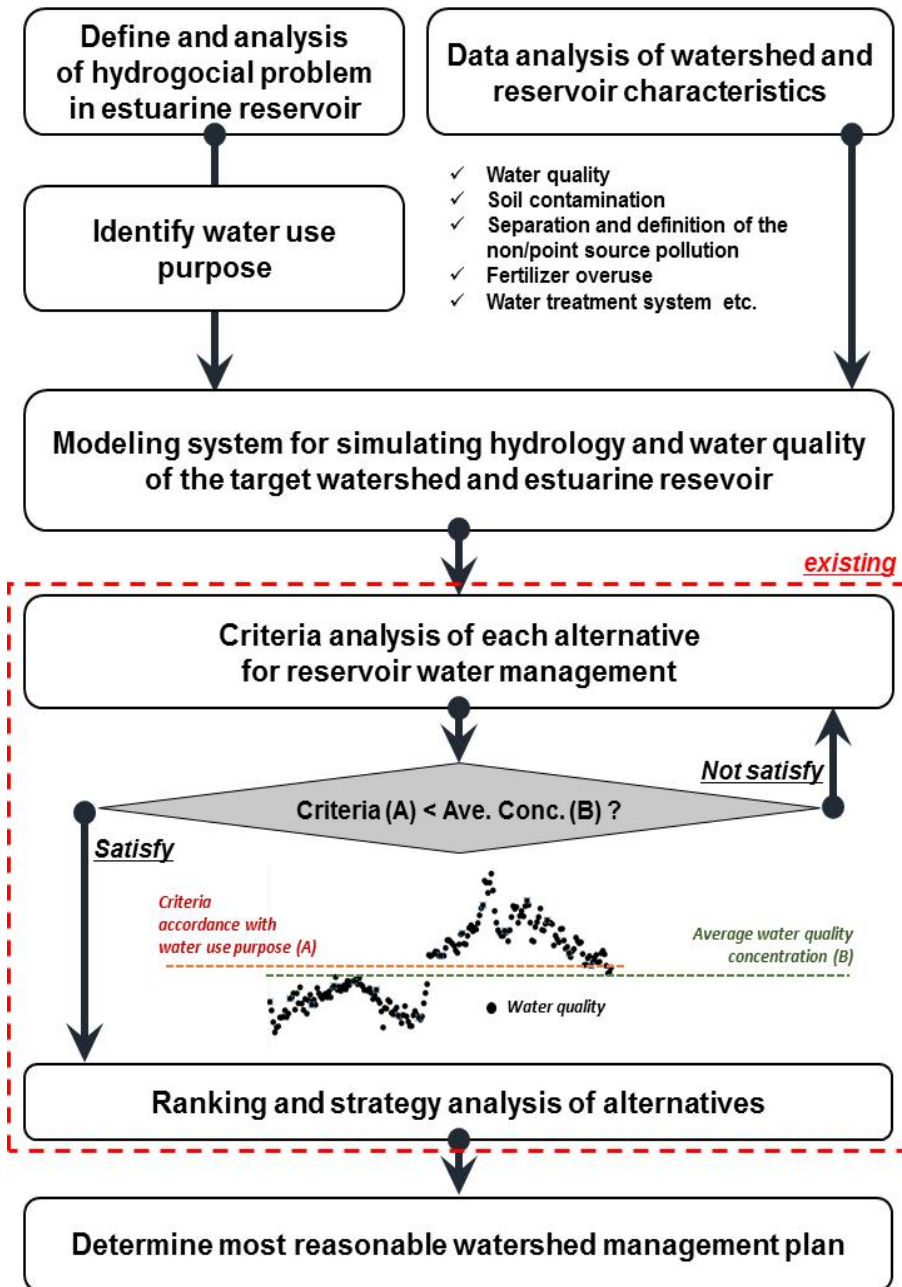


Fig. 2.1. Flow chart of planning reservoir water management

2.2 회복탄력성

2.2.1 회복탄력성의 정의

공학적으로 회복탄력성 (resilience)이란 일반적으로 시스템에 실패 (failure)가 발생할 경우, 회복 (recovery)하는 능력 (ability)과 속도 (speed)의 정도 (magnitude)를 일컫는다 (Loucks 1997; Kjeldsen and Rosbjerg 2004; Vurgin et al., 2010; 강두선 등, 2013; 박진현 등, 2018). 즉, 탄력적인 수자원 관리란 수자원 시스템 설계에 있어서, 수자원 시스템의 실패를 유발하는 외부적인 조건이 주어진 경우, 그 실패를 최대한 빠르게 회복하는 정도를 말하며, 예를 들어 홍수 재해시 홍수 저감 혹은 가뭄 시기에 저수지의 용수 공급 실패를 막기 위한 설계 및 운영이나 하수처리 방류수로 인한 하천의 수질 악화를 최소화하기 위한 효율적인 하수처리장 설계 등에 적용될 수 있다.

회복탄력성 (resilience)의 개념은 최초로 Holling (1973)가 시스템 내 요소별 관계의 지속성을 결정하고, 이러한 시스템이 상태 (state), 구동 (driving) 및 매개 (parameter) 변수의 변화를 흡수 (absorb)하고, 유지 (persist)하는 척도라고 정의하였다. 이후 Hashimoto et al. (1982)는 저수지 용수공급 시스템의 능력 평가를 위해, 신뢰성 (reliability), 회복탄력성 (resiliency), 로버스트 (robustness), 취약성 (vulnerability) 지표 (criteria)를 이용하였으며, Holling (1973)의 연구를 발전시켜 회복탄력성 개념을 지표화하여 공학적으로 이용한 바 있다. 한편, 기존의 회복탄력성 관련 연구들에서 표준 조건 (standard loading)이 시스템에 주어졌을 때 회복 정도를 평가하였다면, Butler et al. (2014)와 Sweetapple et al. (2017)은 회복탄력성의 개념을 예외적인 조건 (exceptional condition) 하에서 시스템이 제공하는 서비스의 실패 정도 (magnitude)와 기간 (duration)을 최소화하는 과정이라고 정의하기도 하며, 여기서 예외적인 조건 (exceptional condition)은 시스템 설계의 로버스트 (robustness) 정

도 (scope and level)를 벗어나는 것으로 간주하였다. 따라서 각 연구 분야에서 적용되는 회복탄력성의 일반적 의미는 거의 유사하다고 할 수 있으나, 연구자가 회복탄력성을 어디 분야에 적용하고 어떤 방법으로 평가할 것이냐에 따라 회복탄력성을 의미하는 바가 조금씩 달라지며, Table 2.1과 Table 2.2는 각 연구자가 정의하는 회복탄력성 (resilience)의 의미와 적용 분야를 나타낸 것이다.

회복탄력성의 개념은 앞서 기술한 바와 같이 추상적인 의미여서 각 연구자가 각자의 연구 목적에 맞게 새롭게 정의를 하고, 그 적용성을 평가하고 있다. 또한 회복탄력성의 개념을 새롭게 적용하는 데 있어서 그 절차를 규정하기 위하여 프레임워크를 제시하고 있으며, Sweetapple et al. (2017)은 하수처리장 방류수 수질을 평가하고 시설을 조절하기 위한 방안으로 회복탄력성의 개념을 도입하여 프레임워크를 제안하였고, Vurgin et al. (2010)의 경우는 지진발생 하에서의 기반시설과 경제적 시스템을 평가하기 위한 프레임워크를 제안한바 있다. 또한 Merrill et al. (2018)은 하구의 사회-환경시스템이 환경 오염의 만성적인 노출 (chronic exposure)에 따른 회복탄력성에 대해 평가를 하는 프레임워크를 제시한 바 있다.

Table 2.1. Application of resilience concept in hydrology and water resources problem

Author	Application filed	Description		
Holling (1973)	<i>Ecological systems</i>	① Determining the persistence of relationships	of state variable, driving variable, and parameters	within a systems.
		② Measuring the ability of absorbing changes		
Hashimoto et al. (1982)	<i>Water supply and demand problem of reservoir</i>	Resiliency will describe how quickly a system is likely to recover or bounce back from failure once failure has occurred.		
Loucks (1997)	<i>Ecological systems</i>	An indicator of the speed of recovery from an unsatisfactory condition.		
Gunderson (2000)	<i>Ecological systems</i>	Engineering resilience is the speed of return to the steady state following a perturbation and Ecological resilience is measured by the magnitude of disturbance that can be absorbed before the system is restructured.		
Kjeldsen and Rosbjerg (2004)	<i>Water supply and demand problem of reservoir</i>	Ability of returning to non-failure state of the system after a failure occurrences.		
		Measuring of how fast a system is likely to return to a satisfactory state once the system has entered an unsatisfactory state.		
Folke et al., (2010)	<i>Water quality problem in river</i>	Systems ability to respond, withstand, and recover from failure (in this research, failure = water quality criteria)		

Table 2.2. Application of resilience concept in hydrology and water resources problem (cont.)

Author	Application filed	Description
Butler et al. (2014)	<i>Climate change and water resources problem</i>	The degree to which the system minimizes level of service failure magnitude and duration over its design life when subject to exceptional conditions.
Sweetapple et al. (2016)	<i>Wastewater-treatment Plant Control</i>	
Simonovic and Arunkumar (2016)	<i>Power plant operation and reservoir water use failure problem analysis using dynamic resilience</i>	Dynamic resilience; “the capacity of an system to anticipate, absorb, accommodate or recover from the effects of a system failure in a timely using various effort” adopted from Simonovic and Peck (2013)
Taleb-Berrouane and Khan (2019)	<i>Pipeline corrosion problem analysis using dynamic resilience</i>	Systems capability to control and rehabilitate a disruptive or failure event

2.2.2 정적 회복탄력성과 동적 회복탄력성

회복탄력성을 공학적으로 평가하기 위한 방법은 크게 정적 회복탄력성 분석 방법과 동적 회복탄력성 분석 방법으로 나뉘며, 동적 회복탄력성 분석 방법은 기존의 정적 회복탄력성이 가지는 시간적 변화를 고려하지 못하는 점을 개선하기 위하여, 제안된 평가 방법이다. 비록 Hashimoto et al. (1982)가 회복탄력성의 정의를 외부 영향을 받아 실패의 상태에서부터 얼마나 빨리, 그리고 얼마나 영향이 적게 회복하느냐로 정의하였으나 이를 신뢰성 (reliability), 회복탄력성 (resiliency), 강건성 (robustness) 그리고 취약성 (vulnerability) 지표를 기반으로 정적 회복탄력성 (static resilience)을 분석한 이래로 많은 연구자들이 본 지표들을 각 연구에 적합하게 정의하거나 조합하여 회복탄력성을 분석하여 왔다 (Hashimoto et al., 1982; Louks, 1997; Maier et al., 2001; Maier et al., 2002; Chang and Shinozuka, 2004; Kjeldsen and Rosbjerg, 2004; Sweetapple et al., 2017; 강두선 등, 2013 박진현 등, 2018). 하지만 전통적 정적 회복탄력성 평가방법 (traditional performance measure)인 확률적 회복탄력성 분석 방법은 시스템의 시간적 변화에 따른 회복탄력성의 변화를 고려하지 못한다 (time-independent)는 한계가 있으며 (Simonovic et al., 2016), McMahon et al. (2006)은 서로 다른 실패 사건에서도 같은 값을 보이는 점을 지적한 바 있다. Simonovic et al. (2016)의 연구 결과에서도, 기존의 회복탄력성 분석 방법에서 회복탄력성 단일 값만 비교해서는 저수지 시스템의 성능을 충분히 평가하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서, Rose (2007), Simonovic et al. (2016) 등은 정적 회복탄력성 분석 방법의 한계를 보완하기 위하여 동적 회복탄력성 분석 방법을 각 연구에 도입하였으며, 강건성 (robustness), 여분성 (redundancy), 자원효율성 (resourcefulness), 신속성 (rapidity) 4가지 차원 (dimension)을 통해 회복탄력성을 비교, 분석한 바 있다. 본 연구에서는 정적 회복탄력성 분석 방법과 동적 회복탄력성 분석 방법을 모두 고려하여 분석을 진행하였으며 그 결과를 비교하였다.

2.3 유역 및 3차원 수치 모형 기반 유역-호소 수질 모의

담수호의 유역 및 수환경에 대한 분석을 위해서는 관측수가 많은 실측자료를 활용하는 것이 데이터의 정확도 및 불확실성을 줄이는 측면에서 가장 유용하다고 할 수 있으나, 일반적으로 호내로 유입하는 모든 하천에 대한 유량 및 수질 자료나 담수호의 수위 및 수질 변화 등에 관한 자료가 부족한 실정이므로 유역 모의를 위한 수문 모형 및 호내 수체 모의를 위한 3차원 수치 모형을 연계하는 경우가 일반적이다. 연계 모형을 구성함에 있어 유역 모형 (watershed model)은 3차원 수치 모형의 수리동역학 및 수질 모의를 위한 경계 조건이 되며, 내외부적인 (internally and externally) 연계가 필요하다 (Liu et al., 2008).

국내의 경우, 주로 HSPF (Hydrological Simulation Program - Fortran)모형과 EFDC 모형을 연계하여 호소 혹은 저수지 수질 모델링에 주로 이용해 왔으며 (신유리 등, 2012; 성충현, 2014; 송인홍과 성충현, 2016; 오희상과 이한필, 2017; 이영기 등, 2018), EFDC 모형보다 수질 항목을 더욱 상세히 모의할 수 있는 WASP (Water Quality Analysis Simulation Program) 모형까지 연계하여 유역모의에 HSPF, 호내의 수리동역학적 해석에 EFDC 그리고 호내 수질 모의에 WASP 모형을 이용하기도 한다 (박재충 등, 2010). 또한 HSPF-EFDC 연계모형은 호소의 수질 모의뿐만 아니라 하천에서의 보 설치에 따른 영향 (김광문, 2012), 강에서의 실시간 수질 예보 연구에도 활용되고 있다 (나은혜 등, 2014). 그 외에도 SWAT 모형과 EFDC 모형을 연계하여 호소 혹은 저수지에서 상류 유역 유입량 및 수질 자료 모의를 위해 SWAT (Soil&Water Assessment Tool) 모형을 이용하고, 호내 수질 변화 모의를 위해 EFDC 모형 혹은 EFDC-WASP 연계 모형을 이용하기도 하고 있다 (노희진, 2011; 김영도 등, 2011; 노희진 등, 2013; 신섿별 등, 2018; 황순호 등, 2018). 특히, 황순호 등 (2018)은 호내 비소 (Arsenic, As) 모의를 위해 SWAT-EFDC-WASP 모형을 연계하여, 유역 유입량 및 유사량 모의를

위해 SWAT 모형과 소규모 저수지의 수리 동역학적 해석을 위해 EFDC 모형을 이용하였고, EFDC 모형에서 상세한 중금속 항목 모의가 어렵다는 점을 보완하기 위하여, 중금속 항목별 모의가 가능한 WASP 모형을 함께 연계하기도 한 바 있다.

국외의 경우에도 상류 유역 유입량을 모두 해석이 어려운 경우 다양한 연구에서 유역 모형과 호소 모형을 연계한 연구를 수행하고 있으며, Kim et al. (2014)은 HSPF-EFDC 연계모형에서 하천에서의 녹조 모의의 예측 정확도를 높이기 위하여 EnKF (ensemble kalman filter) 기법을 적용하기도 하였다. 국내외 유역 모형과 수리동역학적 모형 연계 사례를 요약해 보면, 각 연구자는 대상지의 관측자료 현황 및 수문학적 특성과 모의하고자 하는 수질 항목에 따라 다양한 유역 모형과 수리동역학적 모형을 연계하고 있음을 알 수 있으며, 적절한 모형을 선택하고 연계하는 것이 대상 유역의 수문학적 문제 해결에 중요한 시발점이라 할 수 있다.

유역 모형 중 최근 많이 활용되고 있는 모형은 HSPF, SWAT, SWMM (Storm Water Management Model) 등이 있으며, 이 3 가지 유역 모형은 각각 도시 및 농업 복합지역, 농촌지역 그리고 도시지역 모의에 주로 이용되고 있다. 세 수문 모형의 비교는 Table 2.3과 같으며, 특히 Table 2.4는 HSPF 모형과 SWAT 모형을 비교한 것이다. HSPF 모형에 비해 SWAT 모형의 경우 모의 시간 간격이 일별뿐만 아니라 일 (daily) 모의 기간보다 짧은 기간에 대한 모의를 위해 일별 강우자료를 이중지수 함수 (double exponential function)로 시간 분해하여 Sub-daily 모의하는 기능도 제공하고 있다. 그리고 수문학적 반응 단위로 소유역을 구분하여 모의가 가능하므로 소유역의 토지이용별 토양 특성 등의 입력이 용이하여 소유역별 논 토양의 오염 정도 및 영농 방법의 적용을 달리할 수 있는 장점이 있다.

본 연구 대상지인 간월호 유역의 경우, 농경지의 비중이 높고 본 연구에서 중요하게 다루는 농경지에서의 작물 재배 및 시비 등의 농업 활동을 반영하기 위하여 SWAT 모형을 적합 유역 모형으로 선정하였다.

Table 2.3. Comparison of SWAT, SWMM, and HSPF model (환경부, 2007)

Name of model	Developer	SWRRBWQ /SWAT	SWMM	HSPF
Landuse	urban	○	●	●
	agricultural			
	point source			
Hydrology	runoff	●	●	●
	lateral and return flow			
Pollutant load	soil	●	●	●
	nutrients			
	etc.			
Pollutant simulation	non-linear	●	○	●
	turbulent			
Input data	needed	◐	●	●
	calibrated			
	default			
	interface			
BMP	assessment	◐	●	●
	design			

● : excellent, ◐ : good, ○ : low, - : bads

Table 2.4. Comparison of SWAT and HSPF model (국립환경과학원, 2014)

Comparative indicators	SWAT	HSPF
Operating environment	Linkage with ESRI ArcGIS	Linkage with BASINS based on ESRI ArcView GIS
Components	Hydrology, Meteorology, Sediments, Soil Temperature, Crop Growth, Nutrients, Pesticides, Tracking Stream and Reservoir outflow	Simulation of runoff and water quality for permeable and impervious areas due to rainfall
Time scale	Long-term/continuous/one-year unit simulations	Long-term/continuous/time-year unit simulations (Possible to simulate initial outflow from impervious indicators)
Watershed components	Consists of subwatershed, reservoir, groundwater, and stream separated by weather and HRU.	Consists of harvest areas, impervious areas, mixed urban-non-urban areas, rivers, and reservoirs.
Potential Evapotranspiration	Potential & actual transpiration, water and nutrient absorption, crop growth DB	Empirical formulas and application of actual or calculated amounts of evapotranspiration in each layer
Surface runoff	Runoff by SCS-CN value Peak flow simulation by SCS TR-55 method	Empirical outflows reflecting surface storage Surface runoff simulation by Chezy-Manning formula
Subsurface runoff	Lateral subsurface flow by kinematic storage model Groundwater flow using empirical relationship	Simulation of subsurface runoff, infiltration, and groundwater runoff using empirical relationships
Streamflow	Flow control by flow tracking, transfer loss, evaporation, frequency, regression, etc. based on various storage constants and Manning formula	All inflows at one upstream point Outflows based on reach volume or user-supplied value

제 3 장 회복탄력성 기반 담수호 수질 관리 방안 평가

3.1 동적회복탄력성 기반 수질 관리 방안 평가

본 연구의 범위는 담수호 수자원 관리를 위한 방안의 평가를 위해 회복탄력성의 개념을 적용하는 것이며, 기존에 담수호 수질 기준을 평가하는 방법의 대안을 제시하기 위함이다. 회복탄력성의 개념은 최근 들어, 다양한 분야에 적용되고 있으나 새로운 분야에 회복탄력성의 개념을 적용하기 위해서는 적용 분야에 맞게 그 개념 및 지표를 새롭게 정의할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 담수호 수질 개선을 위한 방안을 평가하기 위한 회복탄력성 개념 및 방법을 정의하고 활용하였다.

본 연구에서는 담수호 수자원 관리 방안의 동적 회복탄력성 개념을 기반으로, 담수호 수자원 관리 방안 평가를 수행하였으며, 그 모식도는 Fig. 3.1과 같다. Fig. 2.1의 기존 담수호 수질 관리 방안 평가 체계를 대체하기 위하여, 기존 (existing) 분석 방법과 더불어 방안별 동적 회복탄력성 분석 방법을 추가하여, 담수호 수질 개선을 위한 방안을 다각적으로 평가하고 분석하는 방법을 개발하였다.

Fig. 3.1에 도시한 바와 같이 회복 탄력성을 분석하기에 앞서 우선, 대상 담수호의 수질 문제를 정의하고, 용수 이용 목적별 수질 기준을 구분하여야 한다. 또한 담수호의 수질 개선 시나리오를 검토하기 위해서는 다양한 조건에 따른 담수호의 수질 변화를 모의해야 하므로, 유역 모형 및 호소 모형을 이용한 모델링과 이를 위한 기초 자료 구축이 필요하다.

수질 문제를 정의하고, 자료 구축을 통해 다양한 수질 개선 시나리오를 검토할 수 있으며, 수질 개선 시나리오별 동적 회복탄력성 분석을 수행한다. 최종적으로는 다양한 수질 개선 시나리오에 따른 수질 개선 효과를 회복탄력성 분석을 통해 분석하고, 담수호 수자원 관리 방안을 평가에 활용하는 것이 본 연구의 최종 목적이라 할 수 있다.

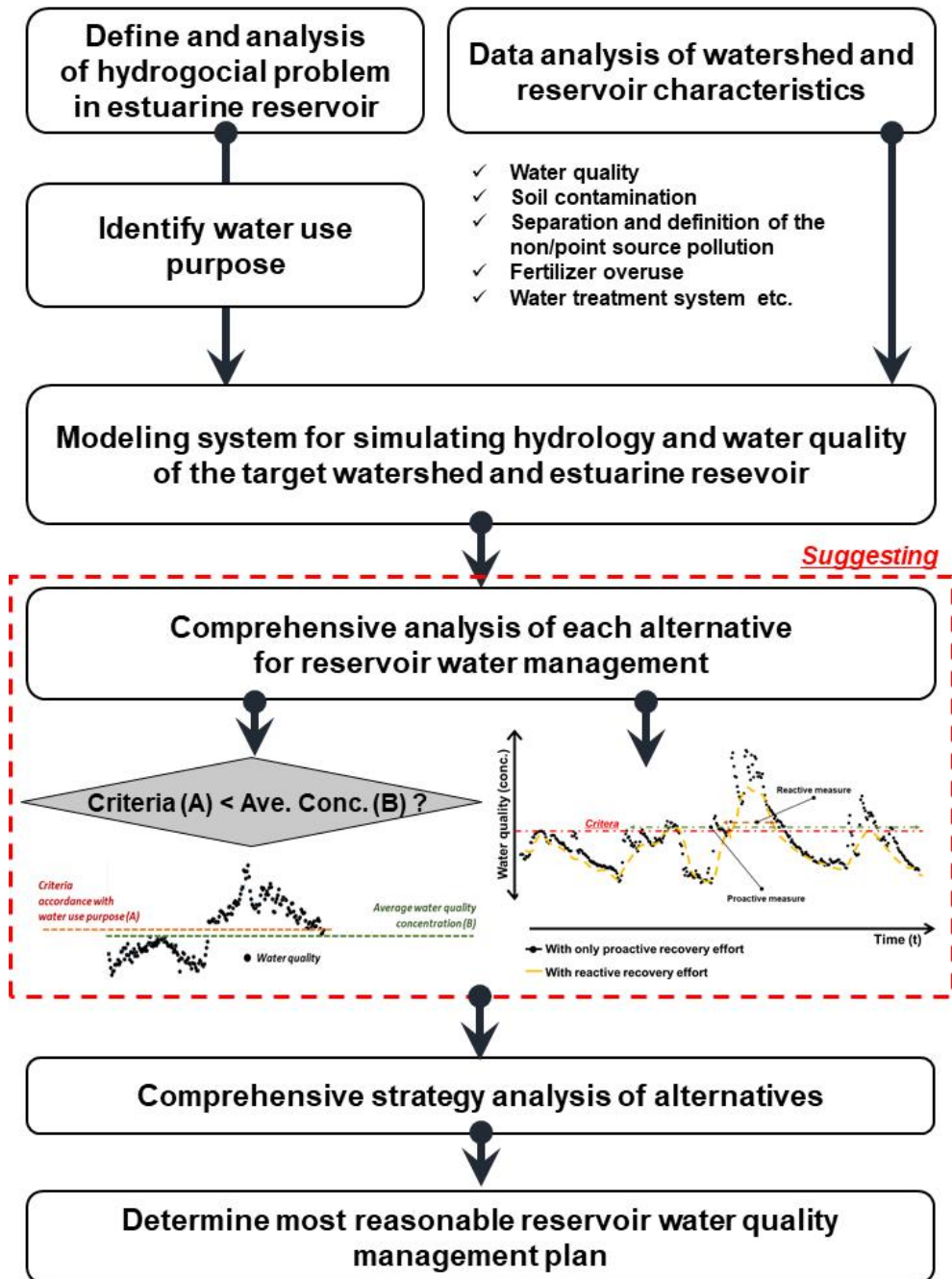


Fig. 3.1. Flowchart of establishing water quality management plan based on dynamic resilience analysis in estuarine reservoir

3.1.1 담수호 수자원의 회복탄력성 정의

시스템에 외부 영향이 주어졌을 때, 시스템이 실패의 상태 (failure state)에서 회복하는 과정은 일반적으로 Fig. 3.2와 같으며, 과정을 간략하게 기술하면, 안정적인 상태 (stable state)에서 외부 영향에 따른 실패 상태로의 변화를 겪고 다시 안정적인 상태로 회복 (rehabilitation)하는 과정이라 할 수 있다. 시스템의 실패 상태에서 회복하는 과정의 모양이 욕조의 모양과 유사하여 Fig. 3.2의 그래프를 욕조 커브 (bathtub curve)라고 일컫기도 한다.

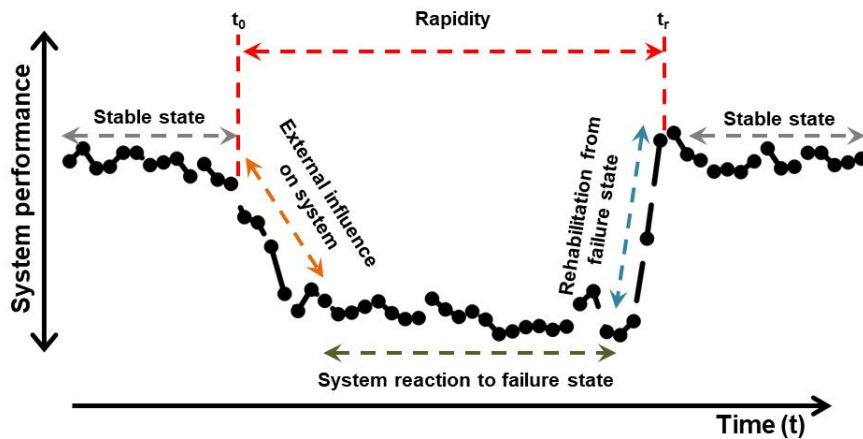


Fig. 3.2. Generic bathtub curve of system resilience

기존의 타 연구에서 외부의 영향으로 정상상태를 벗어나는 시점을 다루는 문제와는 달리, 담수호의 수질 문제는 단순히 정상상태를 벗어나는 시점을 한 가지 기준으로 정의하기는 어렵다. 따라서 담수호의 수질 회복탄력성 분석에 유효한 기간은 각 연구에서 용수 이용 목적에 맞는 수질 기준 (standard 혹은 criteria)을 우선 정의하고, 수질 기준을 초과하는 시점으로부터 다시 수질 기준을 만족하는 시점까지라고 할 수 있다. 물론 수질 기준을 평가하는 방법도 연별 분석이나 연평균 분석 등 다양

한 분석 기준이 있으므로 각 연구자가 회복탄력성 분석을 위해 정의하는 기간과 수질 기준은 연구 방향의 결정에 있어서 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 연별 수질 변화 자료 중에서 수질이 급격히 악화되는 구간에 대해 정적 및 동적 회복탄력성 분석을 수행하였으며, 연평균 수질 분석을 병행하여 담수호 수질 개선을 위한 방안을 평가하였다.

본 연구에서는 수질이 악화를 유발하는 외부 영향은 유역 유입 유량, 저수지 방류 시기, 상류 유역 하수처리장 방류수, 비점오염원의 유입, 강우 및 온도 등의 기상 조건 등으로 구분하여 모델링에 반영하였다. 또한 담수호의 수질 방안을 선제적 개선 방안 (proactive measure) 과 반응적 개선 방안 (reactive measure)으로 구분하였으며, 본 연구에서는 담수호의 내부 부하량을 저감하는 것이 담수호의 회복 능력을 높이는 요인뿐만 아니라 선제적 개선 방안으로 하였고, 하수처리장 방류 부하량을 저감하는 것을 외부 영향을 줄이는 것뿐만 아니라 반응적 개선 방안으로 구성하였다. 즉, 수질 개선 대안별 회복탄력성 분석의 효용성을 높이하고자 Fig. 3.3과 같이 하수처리장의 운영을 고려하여 수질이 악화되는 시기에 더욱 적극적인 수질 개선 방안을 적용하는 시나리오를 구성하여 분석을 진행하였다.

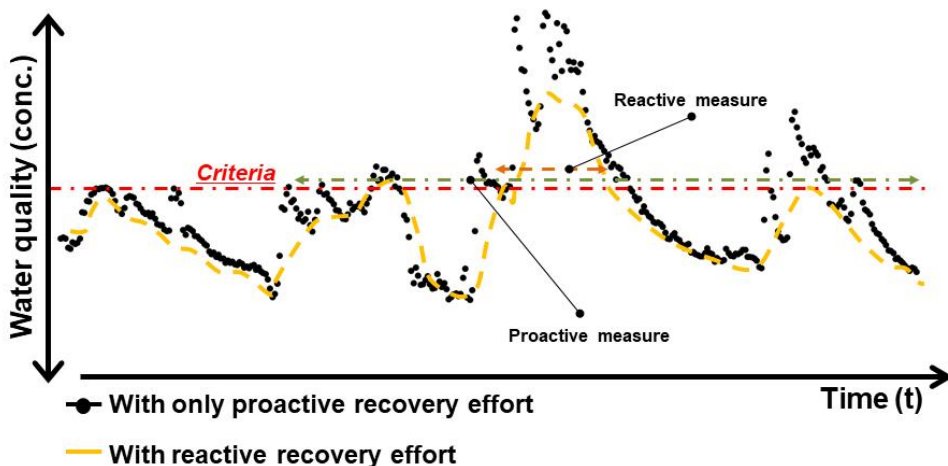


Fig. 3.3. Water quality changes with proactive or reactive measure

3.1.2 담수호 수자원의 회복탄력성 평가

가. 정적 회복탄력성 (static resilience)

첫 번째 대표적인 정적 회복탄력성 분석 방법은 식 (3-1)과 같이 총 회복탄력성 손실량으로 평가하는 방법이다 (Bruneau et al., 2003; Cimellaro et al., 2010; Bocchini et al., 2014; 김병일 등, 2014).

$$RL = \int_{t_0}^{t_r} [P(t_0) - P(t_i)]dt \quad \text{where, } t_i \in [t_0, t_r] \quad (3-1)$$

여기서, RL 은 총 회복탄력성의 손실 (total resilience loss), $t(0)$ 는 시스템에 방해 (disruption) 혹은 실패 (failure)가 발생하는 시간, $t(r)$ 은 시스템이 초기 수준으로 회복 (recovery)하는 시간을 말한다. 또한 $P(t_i)$ 는 각 시점(t)에 대해 방해가 발생하기 전 시스템의 초기 수준 ($P(t_0)$)으로 회복하는 정도를 나타낸다.

Attoh-okine et al. (2009)은 총 회복탄력성 손실을 회복탄력에 필요한 시간으로 나누어 신속성 (rapidity) 고려한 회복탄력성 (resilience) 산정 방법을 정의하기도 하였다 (식 3-2).

$$Resilience\ loss = \frac{\int_{t_0}^{t_r} Q(t)dt}{100(t_0 - t_r)} \quad (3-2)$$

여기서, $Q(t)$ 는 시스템의 성능 (performance), t_0 는 외부 영향을 받아 시스템이 안정적인 상태 (stable state)를 벗어나는 시점이며, t_r 은 실패의 상태에서부터 회복하는 시점이라 할 수 있다.

본 방법은 Fig. 3.4와 같이 강건성 (robustness)과 신속성 (rapidity)의

값이 클수록 회복탄력성 손실은 작아지며 (김병일 등, 2014), 간단한 계산을 통해 단일 값으로 손쉽게 방안별 시스템의 회복탄력성의 손실 정도를 비교할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 단일 값인 총 회복탄력성 손실로는 회복탄력성을 구성하는 시간 종속적 (time-dependent) 요소들을 상대적으로 비교하기는 어려우며, 자칫 왜곡된 결과를 도출할 우려가 있다.

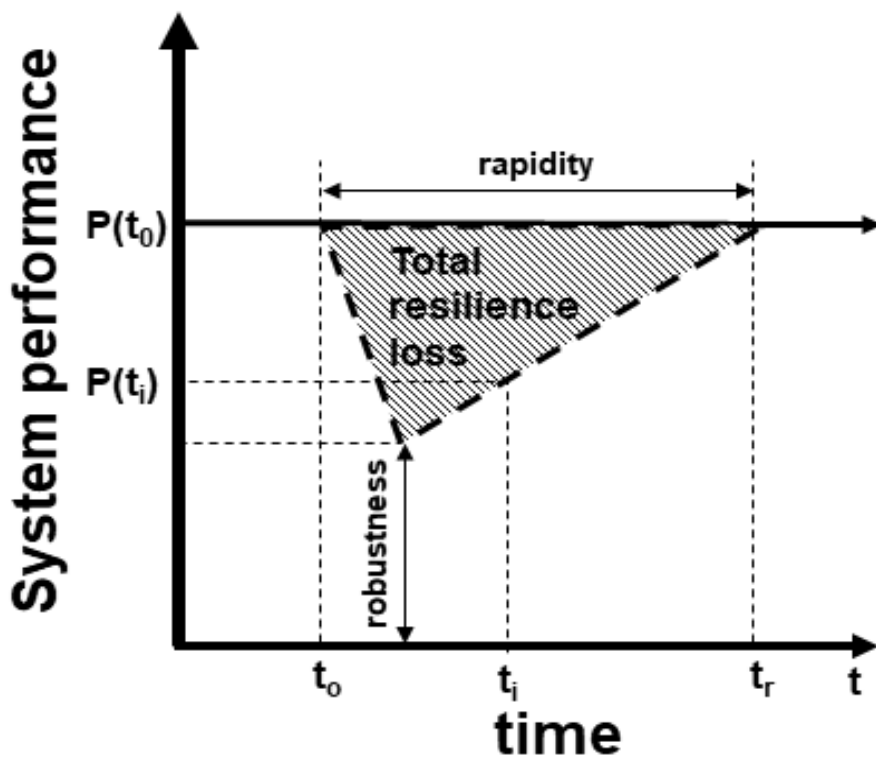


Fig. 3.4. Generic diagram of estimating total resilience loss

두 번째 대표적인 정적 회복탄력성 분석 방법은 식 (3-3)과 같이 확률 기반의 회복탄력성 평가 방법이다 (Hashimoto et al., 1982; Louks, 1997; Maier et al., 2001; Maier et al., 2002; Chang and Shinozuka, 2004; Kjeldsen and Rosbjerg, 2004; Sweetapple et al., 2017; 강두선 등,

2013 박진현 등, 2018)

$$R = \Pr(X(t+1) \in S | X(t) \in WD) \quad (3-3)$$

여기서, $X(t)$ 는 시스템의 상태변수 (state variable)을 나타내고, WD 는 방해가 발생할 경우 (with disturbance), S 는 시스템이 제 기능을 발휘하는 경우 (probabilistically independent success event)를 말한다. 회복탄력성 지수만으로는 외부 환경 변화 혹은 방한별 시스템의 변화를 평가하는데 한계가 있으므로, 신뢰성 (reliability), 견고함 (robustness) 그리고 취약성 (vulnerability) 지표와 함께 많이 사용된다. 하지만 첫 번째 방법과 유사하게 경우의 수 혹은 경우가 발생할 동안의 회복탄력성 손실 등 단일 확률값으로 방한별 시스템의 변화 평가를 용이하게 평가할 수 있다는 장점이 있으나, 사건 (event)별 결과 산정 과정을 상세히 기술하지 아니하고 확률 결과 값만을 제시한다면 자칫 왜곡된 결과를 도출할 우려가 있다.

본 연구에서는 수질 개선 대안별 정적 회복탄력성의 값을 비교 분석하였으며, 각 시나리오별로 평균 수질 기준을 시스템이 제 기능을 한다고 가정하였고, 평균 수질 기준을 초과하는 상태에 대해 회복탄력성을 상실해 가는 과정이라 가정하였다. 회복탄력성 손실량의 총합은 식 (3-4)와 같으며, 수질의 경우 초과할 시, 수질 기준보다 큰 값을 가지므로 본 연구에서는 회복탄력성 손실량을 양으로 표현하기 위하여 식 (3-1)을 본 연구에 맞게 수정하였다.

$$RL = \int_{t_0}^{t_r} [WQ(t_i) - WQ(t_0)] dt \quad \text{where, } t_i \in [t_0, t_r] \quad (3-4)$$

여기서, RL 은 수질 기준을 초과할 때 총 회복탄력성의 손실 (total resilience loss), $t(0)$ 는 연평균 수질 기준을 초과하는 시점, $t(r)$ 은 수질

이 회복되어 연평균 수질 기준을 다시 만족하는 시간을 말한다. 또한 $WQ(t_i)$ 는 각 시점 (t)에 대해 각 시간별 수질 값을 나타내며, $WQ(t_0)$ 는 각 대안별 연평균 수질 기준을 나타낸다.

나. 동적 회복탄력성 (dynamic resilience)

동적 회복탄력성이란 정적 회복탄력성의 한계를 극복하고, 시간 종속적 (time-dependent) 요소들을 고려하고자 최근에 제안된 회복탄력성 분석방법이다. 첫 번째 동적 회복탄력성 분석 방법으로 Bruneau et al. (2003)은 회복탄력성을 강건성 (robustness), 여분성 (redundancy), 자원효율성 (resourcefulness), 신속성 (rapidity) 4가지 차원 (dimension)을 제안하였다. 아래는 Bruneau et al. (2003)이 제안한 네 가지 차원에 대한 정의이다.

- Robustness : 주어진 수준의 외부 영향 (stress or demand)을 기능의 저하 또는 손실 없이 견딜 수 있는 시스템의 강도 또는 능력
- Redundancy : 시스템의 방해 (disrupt) 조건 하에 기능적 요구를 만족시키기 위해 시스템의 요소 중 대체 가능한 능력
- Resourcefulness : 시스템을 방해 (disrupt) 조건이 존재하는 경우, 문제를 식별하고 우선 순위를 설정하며 자원을 동원 할 수 있는 능력
- Rapidity : 시스템의 기능 및 손실을 막고 미래의 혼란을 피하기 위해 우선 순위를 충족하고 적시에 목표를 달성 할 수 있는 역량

Simonovic and Arunkumar (2016)은 이 네 가지 속성을 평가하기 위하여, Fig. 3.5와 같이 시스템의 실패로부터 회복하는 과정 속에서 정의하였다. 여기서, 동적 회복탄력성의 특징을 확인할 수 있는데, Fig. 3.4와 도식을 비교해보면 Fig. 3.5의 세로축의 값이 회복탄력성 (resilience)으로 표현된 것을 알 수 있다. 즉, 회복탄력성을 시스템이 회복하는 과정에서 회복탄력성의 변화의 확인이 가능하다는 차이점이 있고, 시스템을 평가하는

강건성 (robustness), 여분성 (redundancy), 자원효율성 (resourcefulness), 신속성 (rapidity) 4가지 차원을 동적 회복탄력성 분석 과정에서 정의할 수 있다고 하였다.

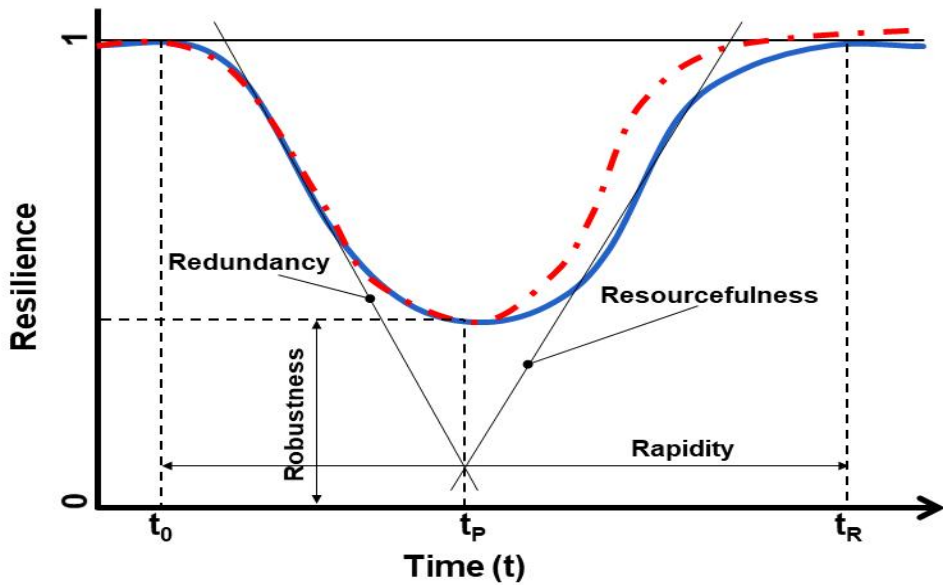


Fig. 3.5. Generic diagram of reservoir system resilience (adapted from Simonovic and Arunkumar, 2016)

본 연구에서는 기존의 수질 기준 만족 여부를 묻는 담수호 수질 개선 평가 방법을 보완하기 위하여 회복탄력성의 개념을 활용하였으며, 시간별 동적 회복탄력성의 수학적 산정을 위해 우선 식 (3-5)와 같이 시간별 시스템의 기능적 손실 (loss of performance)를 산정하였다.

$$\rho(t) = \int_{t_0}^t [P_0 - P(x)] dx \quad (3-5)$$

여기서, t 는 $[t_0, t_r]$ 의 범위 내에 있는 변수이고, $P(x)$ 는 시스템의 능력

(performance), P_0 는 시스템의 초기 수준 (initial performance level)을 나타낸다.

식 (3-4)에서 산정한 시간별 손실량을 통해 아래 식 (3-6)과 같이, 시간별 회복탄력성 값을 앞선 Attoh-okine et al. (2009)이 제안한 방법과 유사하게 회복탄력성 분석 시점까지 소요되는 시간 ($t-t_0$)을 고려하여, 시스템 손실량 ($\rho(t)$)을 0에서 1 사이의 값으로 표준화 (normalizing)한 회복탄력성 ($r(t)$) 산정 방법을 제안하였다.

$$r(t) = 1 - \left(\frac{\rho(t)}{P_0 \times (t-t_0)} \right) \quad (3-6)$$

두 번째 동적 회복탄력성을 정의한 경우는 시간별 회복탄력성의 변화를 분석하는 의미로서 Rose (2007)의 경우, 동적 회복탄력성을 좀 더 광의 (broad definition)로 회복탄력성의 분석을 시간별로 분석하는 것으로 정의하였으며, 시간 경과에 따른 대책별 시스템의 회복 차이를 분석한 바 있다. Fig. 2.6은 시스템 회복의 과정에서 동적인 경제적 회복탄력성 (dynamic economic resilience)을 추정하기 위해 시간 변화에 따른 회복탄력성의 변화 측면을 고려하였음을 나타내며 동적인 경제적 회복탄력성 (dynamic economic resilience)을 산정하는 지표는 아래 식 (3-7)과 같다.

$$Dynamic\ Resillience = \sum_{i=1}^N SO_{HR}(t_i) - \sum_{i=1}^N SO_{WR}(t_i) \quad (3-7)$$

여기서, N 은 Fig.에서 계단식으로 표현된 부분과 같이 고려된 시간 단계 개수를 나타내며, $t(i)$ 는 i 번째 시간 단계, SO_{HR} 은 신속한 복구 (hastened recovery)를 위해 노력하는 동안 시스템의 출력, SO_{WR} 은 신속한 복구를 위한 노력이 없을 때, 시스템의 출력을 의미한다.

본 연구에서는 여러 가지 동적 회복탄력성 분석 방법 중 Simonovic and Arunkumar (2016)이 제안한 방법을 이용하였으다. 식 (3-4)에서와 마찬가지로 수질 개선 대안별 연평균 수질을 초과하는 시점을 회복탄력을 손실하는 시점이라 가정하였고, 식 (3-5)를 식 (3-4)의 이유와 같이 본 연구의 목적에 부합하게 식 (3-8)과 같이 수정하였다. 회복탄력성 산정 식은 식 (3-6)을 참조하여, 식 (3-9)와 같이 산정하였다.

$$\rho(t) = \int_{t_0}^t [WQ(x) - WQ_0] dx \quad (3-8)$$

여기서, t 는 $[t_0, t_r]$ 의 범위 내에 있는 변수이고, $WQ(x)$ 는 시간별 수질 농도, WQ_0 는 담수호의 시나리오별 연평균 수질 농도를 나타낸다.

$$r(t) = 1 - \left(\frac{\rho(t)}{WQ_0 \times (t - t_0)} \right) \quad (3-9)$$

여기서, $r(t)$ 는 시간별 회복탄력성 값을 나타낸다.

3.2 담수호 특징 및 수질 관리 대책

우리나라 서해안의 담수호는 대부분 수질 문제를 겪고 있는데, 그렇다면, 담수호는 어떤 특징을 가지고 있기에 이런 대부분 수질 문제를 겪고 있고, 어떠한 대책들이 효과가 있을까? 우선, 담수호의 수질 문제는 담수호의 위치 및 구조적 특징과 관련이 있으며 이를 종합해보면 다음과 같다.

- ① 방조제 건설로 인해 해수 유통이 제한적인 담수호는 대부분이 하구에 위치하는 지리적 특성상, 상류의 오염원이 담수호 유입 하천으로 배출되는 경우 담수호는 오염원의 최종목적지가 된다.
- ② 또 다른 지리적 특성으로 인한 담수호의 수질 문제는 담수호의 경우 방조제 건설 후 생기는 간척지를 주로 농경지로 활용하는 경우가 많다는 점이다. 우선, 조간대에서 농경지로 개발된 간척지의 경우, 대표적인 특징으로는 토양 내 염류농도가 높아 배수가 불량한 반면 (문영훈 등, 2016), 유기물, 질소, 유효인산의 함량이 낮으며 양분비가 불균형하다 (농림부, 2004)는 점이 있다. 따라서, 간척지에서 작물의 생산성을 높이기 위해서는 시비량을 늘리는 것이 필요하며 (신재순 등, 2005; 양창휴 등, 2012; 백남현 등, 2013), 이로 인해 담수호 주변 농경지에서 액비 및 비료 등이 과다 시비되기도 한다. 따라서, 과다 시비된 비료는 비점오염원으로 작용하게 되고, 담수호에 인근에 농경지가 분포하기 때문에 오염물질의 담수호 유달율이 매우 높게 된다.
- ③ 방조제 건설로 인해 조류 속도가 늦어지는 담수호의 경우, 표층 퇴적물이 세립화되어 (이태원, 1996; 우한준 등, 2005; 송윤호 등, 2011), 만 입구에서 발생하는 조석에 의한 재부유 작용 (박홍식 등, 2000)으로 저층의 유기물이 쉽게 재공급되어 부영양화에 양의 피드백으로 영향을 미친다.
- ④ 담수호의 경우, 방조제 건설로 해수의 흐름이 차단되고 정체가 되면서, 상류에서 유입되는 유출수와 기존의 호내에 남아 있던 해수 간의 염도 차이와 계절적 특성에 의해 여름에 강한 성층이 발달하게 된다.

따라서, 이러한 강한 성층이 발달한 경우 상하층 간의 흐름이 제한되어, 저층이 빈산소 상태가 되기도 한다. 여기서, 빈산소 상태(hypoxia)란 용존 산소가 2mg/L 이하인 상태를 일컫으며, 빈산소 현상의 증가는 연안(coastal) 환경(Diaz and Rosenberg, 2008) 뿐만 아니라 하구(estuaries) 환경(Stanley and Nixon, 1992; Conley et al., 2009a; Testa et al., 2014), 만(gulf) 환경 문제(Bianchi et al., 2010; 이동관, 2016)에 중요한 이슈이다.

따라서 농업용수 수질 기준에 부합하는 관개용수를 공급하고, 담수호 및 간척지의 친환경적 가치를 높이기 위해서는 담수호의 상류 유역 및 유입 오염물질, 그리고 담수호 수체 특성에 대한 종합적인 이해를 기반으로 수질오염 관리 대책을 수립하는 것이 중요하다.

담수호의 수질 문제를 해결하기 위한 대책은 주로 호내로 유입하는 오염부하량을 줄이는 유역대책과 호내 내부 발생부하량을 줄이는 호내 대책으로 나눌 수 있다(Table 3.1). 유역 대책은 다시 점오염원 대책과 비점오염원 대책으로 나눌 수 있는데, 담수호의 경우, 상류 비점오염원 유입 저감을 위한 최적 영농방법 적용에 관한 연구(강문성, 2010; 장정렬 등, 2011; 신민환 등, 2015; 김계웅 등, 2016; 김종건 등, 2018) 및 담수호 주변의 환경을 최대한 활용하여 비점오염원 저감을 하는 인공습지를 활용한 연구(함종화 등, 2004; 김세원 등, 2009; 최돈혁 등, 2008; 장정렬 등, 2011; 홍정선 외, 2016)가 주로 이루어져 왔다. 상류 대책은 주로 점오염원대책, 비점오염원대책, 축산분뇨처리 대책, 유입 하천의 하천 건천화를 막기 위한 하천 유지용수 확보 및 대책 등이 있으며, 호내 대책은 내부 개발, 호소수 관리, 해수유통, 호내 준설 등을 주로 고려해 왔다. 따라서 본 연구에서는 내부적 요인의 개선을 위한 준설과 외부적 요인인 하수처리장 방류수 유입 두 가지를 고려하여 수질 개선을 위한 방안을 구성하였으며 그 결과를 평가하였다.

Table 3.1. Various practices for managing water quality of estuarine reservoir (or reservoir) in South Korea

Management	Application practices	Authors
Watershed management	Quantitative estimation of pollutant load in watershed inflow by modeling	정광욱 등, 2007; 이상은 등, 2011; 성충현, 2017; 신금진 외, 2019
	Application of best management practices for reducing agricultural non-point pollution source	강문성, 2010; 장정렬 등, 2011; 신민환 등, 2015; 김계웅 등, 2016; 김종건 등, 2018
	Sedimentation basin or facility for reducing phosphorus	이진희 외, 2012 (estuarine reservoir), 장정렬 등, 2004; 배요섭 외, 2008 (agricultural reservoir)
	Artificial wetland for reducing non-point pollution	함종화 등, 2004; 김세원 등, 2009; 최돈혁 등, 2008; 장정렬 등, 2011; 홍정선 외, 2016
Reservoir management	Impact sluice gate control and ocean water circulation on water quality of estuarine reservoir	정종철, 2000; 서승원 등, 2002; 이남주 등, 2006; 송인홍 외, 2016
	Water quality change according to dredging operation	안재환 등, 2005; 김응석 등, 2013; 서명교 등, 2014 (dam and reservoir)
Integrated watershed management	Establishment of integrated coastal and watershed management	강성현 등, 2010; 황대호 등, 2011

3.3 유역-호소 연계모형 기반 모델링 시스템 구축

3.3.1 유역-호소 연계 모형의 구성

담수호의 방안별 회복탄력성을 분석하는 것은 실제 관측하는 것이 가장 정확하다고 할 수 있으나, 시간 및 비용 한계를 지니고 있으므로 수문 및 호소 모형을 이용하여 각 방안별 평가를 수행하는 것이 가장 효율적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 여러 유역 모형 중 SWAT 모형을 이용하였으며 호소 모형으로는 EFDC 모형을 이용하였다. Fig. 3.6은 유역 및 호소 모형의 연계와 입출력 자료를 나타낸 것이다.

우선, SWAT 모형을 이용하여 담수호 상류 유역으로부터 유입량과 수질을 해석의 재현성을 높이기 위하여 수문 및 수질 관측값을 이용하여 보검정을 수행한다. 최적 보검정 결과를 도출한 후 EFDC 모형의 유입량 및 수질 입력자료로 활용하게 된다. EFDC 모형에서는 관측 유출량 (양수장과 갑문을 통한 배수량) 및 저면 토양오염과 기상 자료 그리고 수질 오염 관측 자료를 통해 모형의 매개변수를 결정하고, 모형의 재현성을 높이기 위해 보검정을 수행하게 된다. 최종적으로는 EFDC 모형을 통해 수질 모의 결과를 도출하게 되며, 상류 유역 및 담수호의 시나리오 구성을 통해 수질 관리 방안별 수질 모의 결과를 평가에 활용하게 된다.

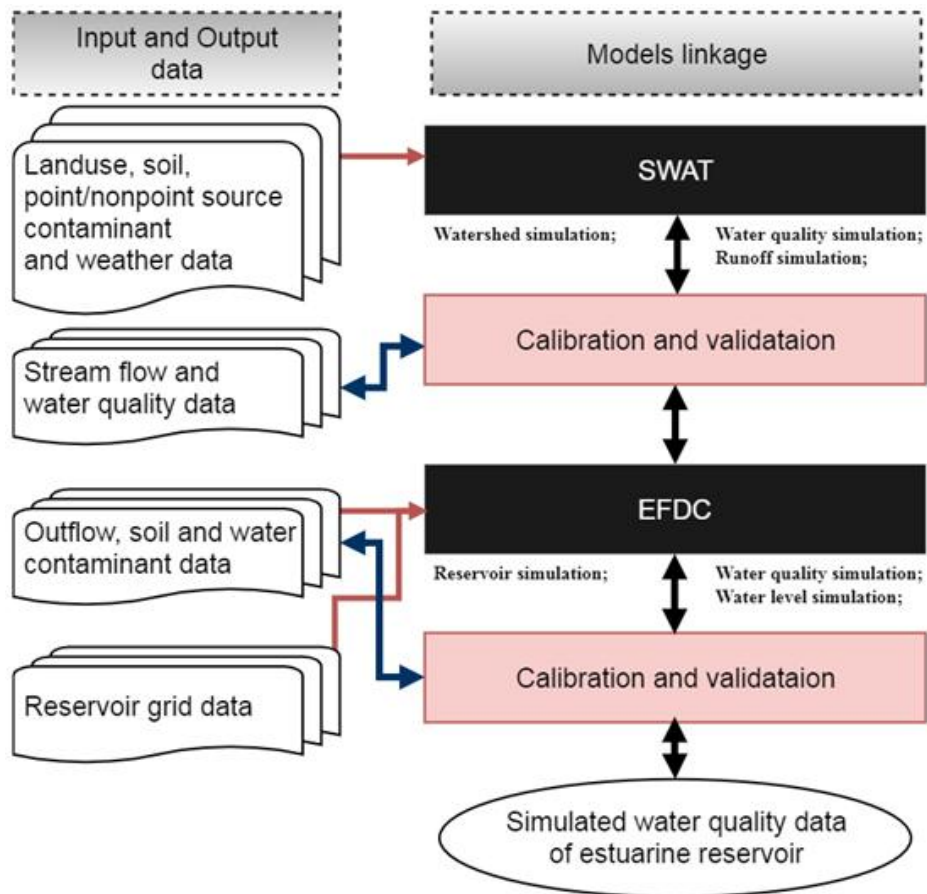


Fig. 3.6. Diagram of SWAT–EFDC linkage for simulating water quality in estuarine reservoir

3.3.2 SWAT 모형

본 연구에서는 담수호의 상류 유역의 유출량 및 수질 모의를 위하여 미국 농무성에서 개발한 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하였다. SWAT 모형은 물리적 기반 (physically-based)의 준분포 (semi-distributed) 수문 모형으로 ① CREAMS (Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) (Knisel, 1980), ② GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) (Leonard et al., 1987), ③ EPIC (Environmental Impact Policy Climate) (Izaurrealde et al., 2006) 모형을 거쳐, ④ SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Arnold and Williams, 1987) 모형을 기반으로 만들어진 모형이다 (Arnold et al., 1996; 강문성, 2002; 김학관, 2009; 이은정, 2011).

다른 수문 모형과 달리 SWAT 모형은 수문반응단위 (hydrological response units ,HRUs)라는 개념을 기반으로 연구 대상유역을 소유역으로 분할하여 수문 순환 해석을 수행한다는 특징을 가지고 있다 (Arnold et al., 1996; Chen et al., 2019). SWAT 모형에서 수문반응단위 (hydrological response units ,HRUs)란 SWAT 모형에서 전체 대상유역을 소유역으로 분할하는 기법으로, 사용자가 정의하는 기준 (user-defined thresholds)을 바탕으로 유사한 토양 (soil), 토지피복 (landcover), 지형 (topography) 특성을 가진 소유역으로 집합 (lumping)하여 수문해석을 하기 위한 방법이며, 각 소유역별 해석을 위해서는 집중형 모형 (lumped-model)을 구성하고, 소유역간 해석은 하도추적을 통해 해석을 하기 때문에 SWAT 모형을 준분포 (semi-distributed) 모형이라 한다. Fig. 3.7은 SWAT 모형 내에서 HRU 및 소유역별 수문 해석 순서를 보여준다.

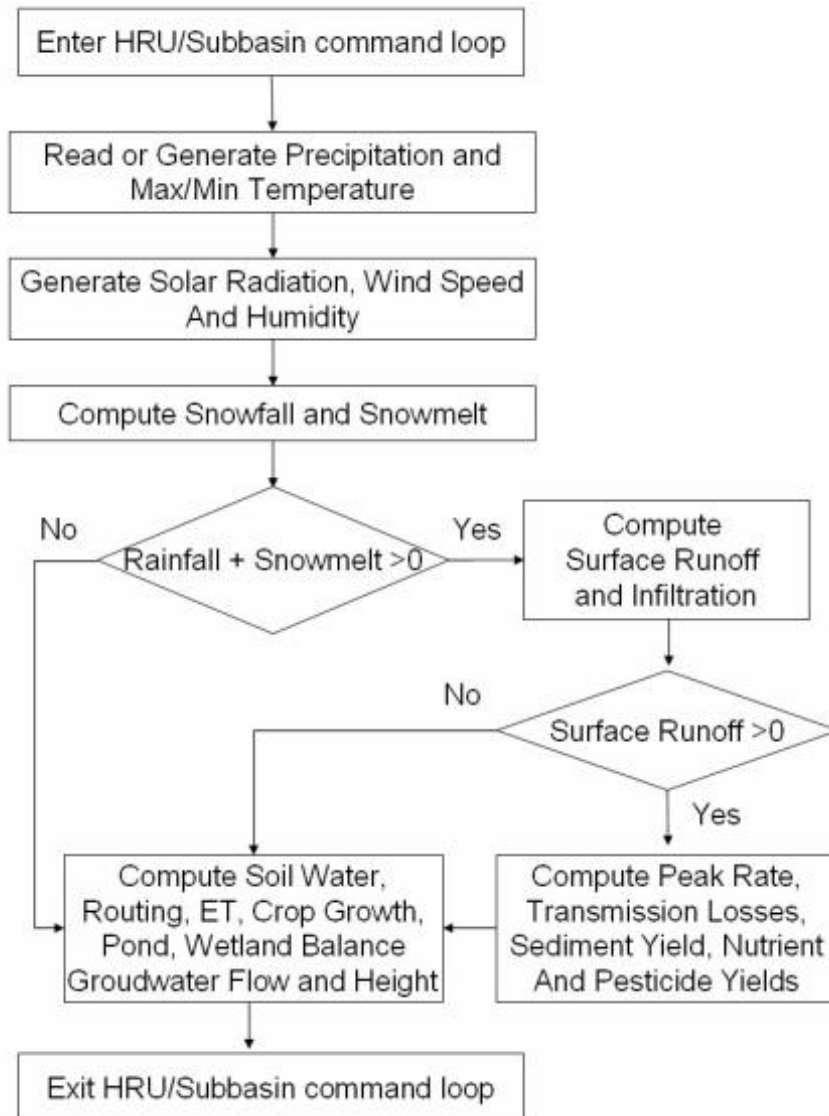


Fig. 3.7. Diagram of hydrology and water quality simulation in SWAT model (adpated from Neitsch et al., 2005)

SWAT 모형에서의 유출량 해석은 크게 두가지 기작 (two major division)으로 이루어지게 되는데, 첫째 기작은 지면에서의 수문 순환 기작을 식 (3-10)과 같이 물수지 방정식 (water balance equation)을 바탕으로 각 소유역 (subbasin)으로부터 주하천 (main channel)에 유입하는 양을 해석하는 것이다. 앞서 기술한 바와 같이 각각의 HRU에서 하나의 물수지 방정식을 통해 수문을 해석하고 있으며, 이에 준분포 수문모형이라 일컫는다. 두 번째 기작은 각 소유역으로부터 주하천으로 유입하는 유출량을 하도추적 (channel routing) 알고리즘에 따라 하천 네트워크를 통해 유역 출구점으로 도달하는 유출량을 해석하는 부분이다 (Neitsch et al., 1996). Fig. 3.8은 SWAT 모형을 이용한 유출량 해석 기작을 모식화한 것이다.

SWAT 모형에서 소유역별 유출량 해석은 식 (3-10)과 같이 물수지 방정식 (water balance equation)을 기반으로 한다.

$$SW_{i+1} = SW_i + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q) \quad (3-10)$$

여기서,

SW_{i+1} 는 i 일의 최종 토양수분량 (mm H₂O),

SW_i 는 i 일의 초기 토양수분량 (mm H₂O),

t 는 시간 (day),

R_{day} 는 i 일의 강수량 (mm H₂O),

Q_{surf} 는 i 일의 지표 유출량 (mm H₂O),

E_a 는 i 일의 증발산량 (mm H₂O),

W_{seep} 은 i 일의 침투량 (mm H₂O),

Q_{gw} 는 i 일의 회귀수량 (혹은 기저하유출량)을 나타낸다.

식 (3-10)의 물수지 방정식에서 독립변수로는 강수량 (R_{day}), 지표유출량(Q_{surf}), 증발산량 (E_a), 침투량 (W_{sep}), 회귀수량 (Q_{gw})이 있으며, 종속변수로는 토양수분 (SW_i) 자료가 있다. 하지만 근래 들어, 미계측 유역의 수문해석이나 수문 모형을 이용한 유역 수문 해석의 자료의 불확실성을 해소하고자 위성영상 혹은 관측된 토양수분 자료 (soil moisture data, SW_i)를 이용하여 본 물수지 해석에서 종속변수인 토양수분 자료 (SW_i)를 독립변수로 하여 자료동화 기법 (data assimilation method) 등을 통한 SWAT 모형을 이용한 수문 해석의 정확도를 높이기 위한 연구도 활발히 이루어지고 있다 (Sun et al., 2016; Patil and Ramasankaran, 2017; Zhang, et al., 2017; Liu et al., 2018).

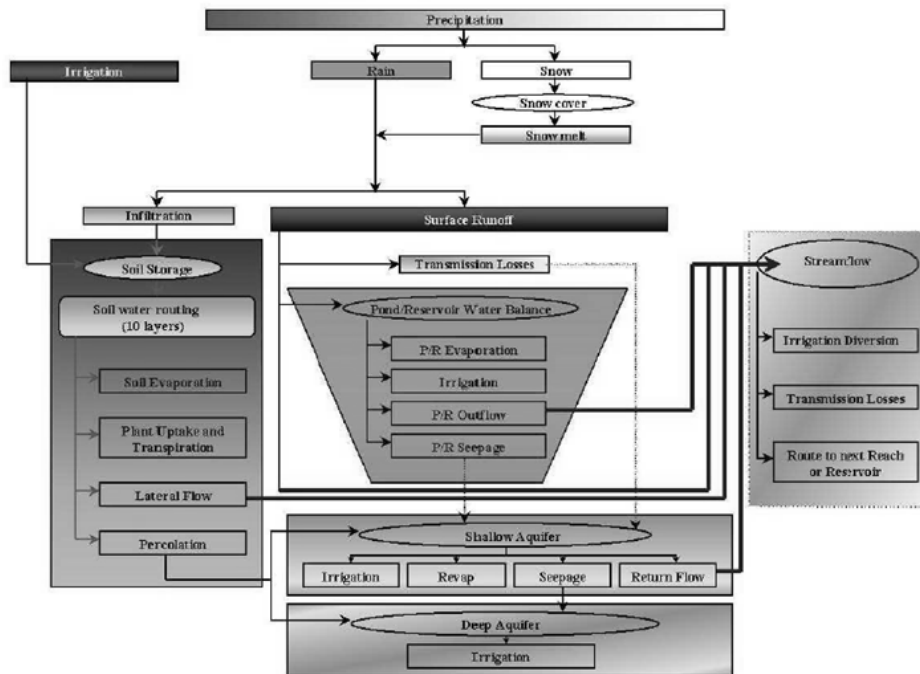


Fig. 3.8. Diagram of relationships of water flow component in SWAT model (adapted from Neitsch et al., 2011)

SWAT 모형에서 하천의 유출량 해석은 Manning's equation을 기본 방정식으로 하고 있으며, 하도 추적은 Variable storage 방법과 Muskingum 추적법 두 가지 방법을 선택할 수 있다. 본 연구에서는 하도추적 방법으로 Muskingum 방법을 선택하였으며, 하도 단면을 Fig. 3.9와 같이 하도 저류량을 쐐기형 저류 (wedge storage)와 기둥형 저류 (Prism Storage)로 나누어 계산하게 된다.

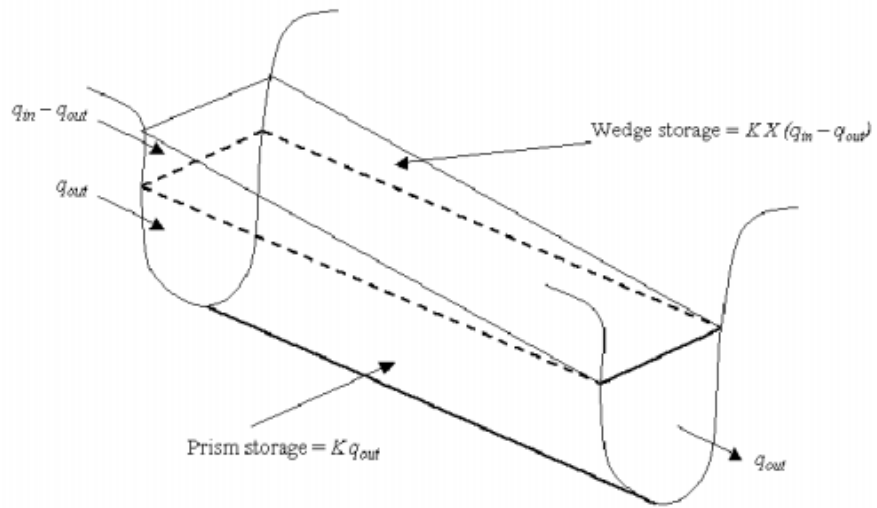


Fig. 3.9. Generic schematic of Muskingum method (adapted from Neitsch et al., 2011)

3.3.3 EFDC 모형

가. EFDC 모형의 개요

EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)는 하천뿐만 아니라 하구, 호소, 저수지 등의 유동 및 물질이동, 수질 변화를 모의하는 3차원 수치모델이다. EFDC는 미국 VIMS (Virginia Institute of Marine Science)에서 개발하였으며, 미국 환경청 (EPA)의 공인 모델로 활용되고 있다. EFDC는 크게 유동, 퇴적물 이동, 수질의 세 요소로 구성되어 있으며, 유동모델은 3차원 천수방정식을 바탕으로 수온과 염분을 함께 고려하여 개발되었다 (Craig, 2009).

EFDC의 3차원 해석은 Blumberg-Mellor 모델 (Blumberg and Mellor, 1987)과 많은 부분에서 유사하며 EFDC 모형은 Blumberg-Mellor 모델을 기반으로 가변 밀도 흐름에 대해 수직적으로 정수압 (vertically hydrostatic) 가정 하고, 자유표면 (free surface), 그리고 난류 평균의 3차원 운동 방정식 (turbulent averaged equations)의 해를 구하는 것이 가능하다 (Tetra Tech, Inc, 2007; Choi et al., 2012; 황순호 등, 2018). EFDC는 수리동역학적 (Hydrodynamics) 모듈, 수질 (Water Quality) 모듈, 유사 운송 (Sediment Transport) 모듈 및 독성물질 (Toxic) 모의 모듈 (중금속 포함) 등 총 4개의 모듈로 구성되어 있다. 수리동역학적 모듈의 계산 결과는 수질모의, 유사 운송, 독성물질 모의 모듈의 입력자료로 사용된다 (Tetra Tech, Inc, 2007; 황순호 등, 2018).

EFDC의 수질모델을 통해 수온, 염분을 비롯한 용존산소, 식물성 조류 (3개 그룹), 탄소순환계, 질소순환계, 인순환계, 규소순환계를 포함하는 22개 상태변수가 모의 가능하다. EFDC의 퇴적물 이동 모의는 DiToro and Fitzpatrick (1993)에 의하여 개발된 CE-QUAL-ICM의 퇴적물 모의 기작을 기본으로 하고 있으며, 점착성과 비점착성의 다양한 크기의 입자를 모의할 수 있다. 또한 농도와 유속 경사에 의한 침강속도, 퇴적물 조

성과 저면전단응력에 의한 재부유 등을 모의할 수 있다.

EFDC 모델은 현재까지 미국을 비롯하여 전 세계적으로 수많은 해역의 연구에 적용되어 왔으며, 국내에서도 새만금, 화성호, 인천만, 아산만, 금강하구, 광양만, 진해만 및 낙동강 하구 등 많은 해역의 해수 유동, 퇴적 작용 및 수질 변화를 재현·예측 하는데 적용된 바 있다 (국립환경과학원, 2014). Fig. 3.10은 EFDC 모델 중 수체 내 유동의 해석을 위한 요소들간의 관계를 개략적으로 나타낸 것이다.

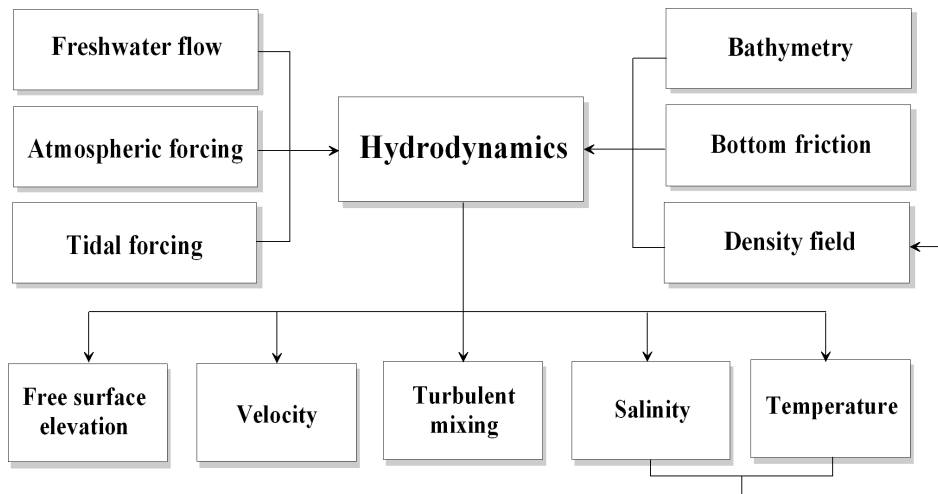


Fig. 3.10. Relationships between simulation component in EFDC model (adapted from Craig, 2009)

나. 기본방정식

EFDC 모델은 연속방정식과 운동방정식, 열염 보존방정식, 그리고 퇴적물을 포함한 물질 보존방정식들로 구성되어 있으며, 열염 보존방정식은 밀도차에 의한 경압력에 의하여 운동방정식과 연계되어 있다. EFDC 모형은 수직 방향으로 σ 좌표계를 사용하고, 수평 방향으로는 직선 또는 직교곡선좌표계를 사용하고 있다. 수직 와동점성계수의 산정에는 Mellor and Yamada (1982)의 level 2.5 turbulence closure scheme을 사용하고, 수평와동 점성계수는 Smagorinsky type diffusivity를 사용한다 (Craig, 2009; 국립환경과학원, 2014). 또한 Mass conservation scheme을 사용한 조간대 처리가 가능하다. 유체정역학적 가정과 Boussinesq 근사를 적용하면 기본방정식을 식 (3-11) - (3-18)과 같이 나타낼 수 있다.

1) 연속 방정식

$$\frac{\partial m\zeta}{\partial t} + \frac{\partial m_y Hu}{\partial x} + \frac{\partial m_x Hv}{\partial y} + \frac{\partial mw}{\partial z} = 0 \quad (3-11)$$

2) 운동방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial mHu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huu) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvu) + \frac{\partial}{\partial z}(mwu) - \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hv \\ &= -m_y H \frac{\partial}{\partial x}(g\zeta + p) - m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(mH^{-1} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u \quad (3-12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial mHv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huv) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvv) + \frac{\partial}{\partial z}(mwv) + \left(mf + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) Hu \\ &= -m_x H \frac{\partial}{\partial y}(g\zeta + p) - m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(mH^{-1} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v \quad (3-13) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb \quad (3-14)$$

3) 상태방정식

$$\rho = \rho(p, S, T) \quad (3-15)$$

4) 물질보존 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(mHS) + \frac{\partial}{\partial x}(m_yHuS) + \frac{\partial}{\partial y}(m_xHvS) + \frac{\partial}{\partial z}(mwS) \\ = \frac{\partial}{\partial z}(mH^{-1}A_b \frac{\partial S}{\partial z}) + Q_S \end{aligned} \quad (3-16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(mHT) + \frac{\partial}{\partial x}(m_yHuT) + \frac{\partial}{\partial y}(m_xHvT) + \frac{\partial}{\partial z}(mwT) \\ = \frac{\partial}{\partial z}(mH^{-1}A_b \frac{\partial T}{\partial z}) + Q_T \end{aligned} \quad (3-17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(mHC) + \frac{\partial}{\partial x}(m_yHuC) + \frac{\partial}{\partial y}(m_xHvC) + \frac{\partial}{\partial z}(mwC) \\ = \frac{\partial}{\partial z}(mH^{-1}A_b \frac{\partial C}{\partial z} + \omega C) + mHR_c + Q_C \end{aligned} \quad (3-18)$$

여기서,

- u, v : 직교하는 곡선좌표계 x, y 에서의 수평 유속
- m_x, m_y : 곡선좌표계 임의거리 $ds^2 = m_x^2 dx^2 + m_y^2 dy^2$ 을 만족시키는
metric tensor의 대각성분의 제곱근($m^2 = m_x m_y$)
- w : 변환된 무차원 연직좌표계 z 에서의 수직 유속성분
- H : 총 수심 ($=h+\zeta$)
- h : 기준면하 수심
- ζ : 기준면상 수위
- p : 수심 z 에서 기준수압($\rho g H(1-z)$)과의 차를 p_0 로 나눈 값
- f : Coriolis parameter
- A_v : 수직 난류점성계수
- A_b : 수직 난류확산계수
- Q_u, Q_v : 운동량의 source-sink 항
- ρ : 밀도
- T, S : 수온, 염분
- b : 부력
- ω : 침강속도
- C : 용존 또는 부유물질의 농도
- Q_T, Q_S : 수평 난류확산 및 수온과 염분의 source-sink 항
- R_C, Q_C : 수평 난류확산 및 생화학적 또는 외부 source-sink 항

EFDC 모의에서 중요한 점은 조류와 용존 산소에 의한 탄소화합물의 일차생산물 (인, 질소 등)을 정확히 모의하는 것이다. 일차생산물은 생태계에 에너지 제공 역할을 하기도 하지만, 수체 내에 일차생산물이 과도할 경우, 일차생산물은 그 분해 과정에 있어서 산소를 고갈시켜 오히려 수질을 악화시킬 수 있다. 일차생산물과 용존산소를 모의하기 위해서는 다양한 수질 항목에 대한 모의가 필요하며, 21개 항목 이상의 변수를 계산하기 위해 염도, 수온 및 총 부유 물질은 EFDC 모형 내에 수리역학 모듈에 의해 별도로 계산된다 (Craig, 2009; 국립환경과학원, 2014). Fig. 3.11은 수질 변수 간 상호작용을 나타낸 것이다.

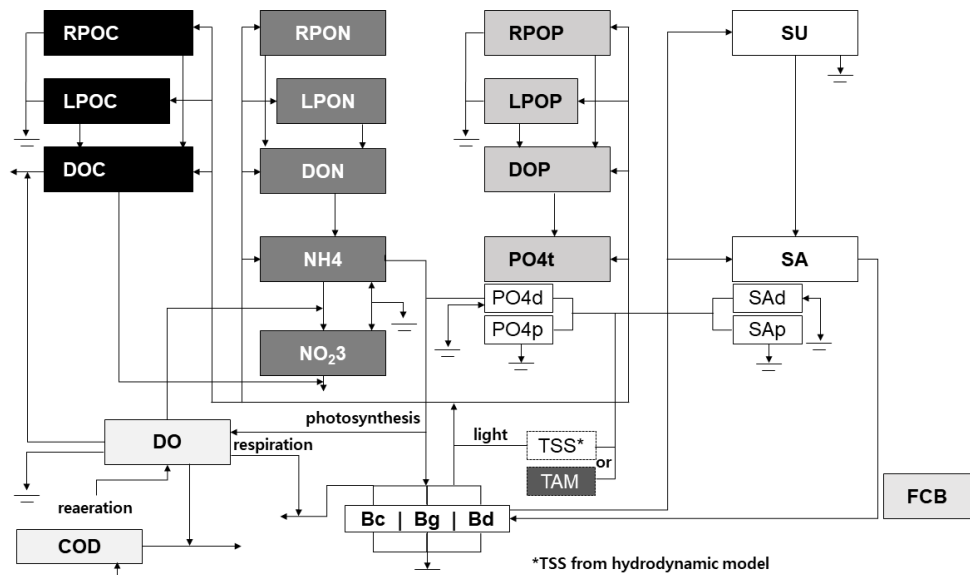


Fig. 3.11. Relationship of EFDC model parameters (adapted from Craig, 2009)

제 4 장 대상 유역 및 입력 자료 구축

4.1 대상 담수호 및 유역 특성

4.1.1 대상 담수호 및 유역 개요

본 연구의 대상 담수호로 충청남도 홍성군에 위치한 간월호를 선정하였다. 간월호는 서산A지구 간척사업과 함께 1995년에 조성된 담수호로 유역면적, 수해면적 및 만수면적은 각각 48,770 ha, 6,446 ha 및 2,504 ha 이다. 간월호로 유입되는 하천은 야당천, 둔당천, 청지천, 도당천, 기포천, 소정천 및 와룡천 등 총 7개이다. Fig. 4.1은 간월호의 위치를 나타내고 있다.

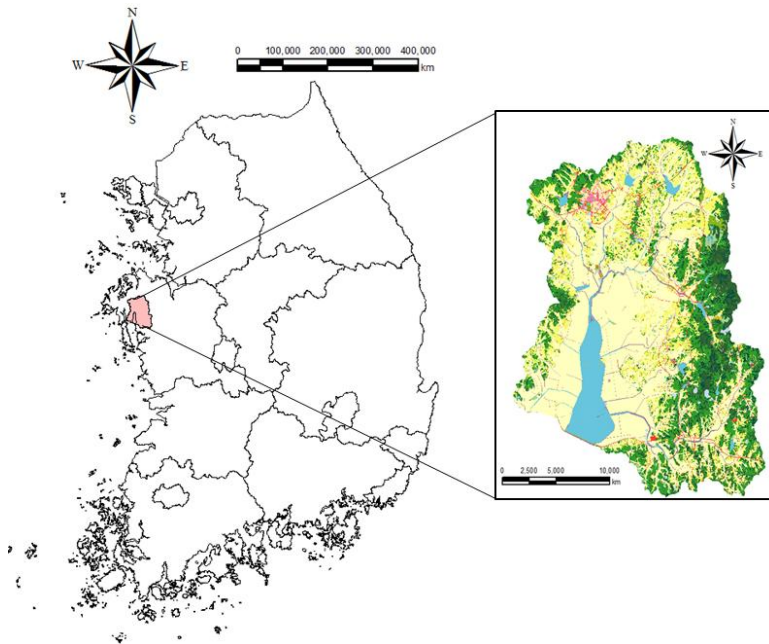


Fig. 4.1. Location of the Ganwol estuarine reservoir

4.1.2 대상 유역 현황

가. 수치표고모델

국가공간정보포털에서 제공하는 1:5,000 NGIS (national geographical information system) 수치지도를 이용하여 간월호 유역의 수치표고모델 (digital elevation model, DEM)을 구축하였다 (Fig. 4.2). DEM의 해상도는 30 m이며, 간월호 유역의 경계는 200 - 700 m (El.)의 비교적 낮은 산지로 형성되어있고, 간월호 인근 농경지의 표고는 1 m (El.) 내외로 나타났다.

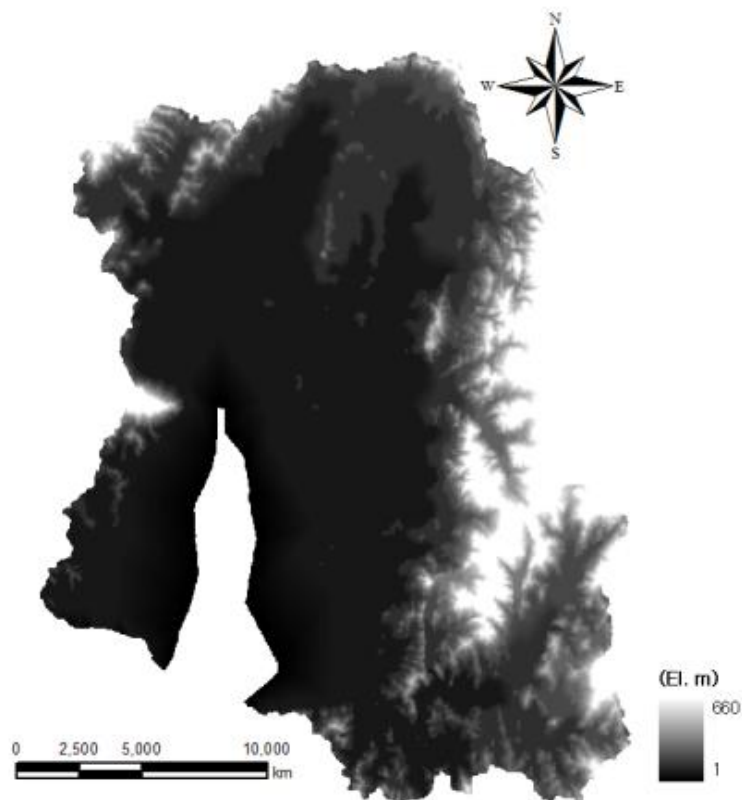


Fig. 4.2. Digital elevation model of the Ganwol estuarine reservoir watershed

나. 토양도

농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 이용하여 간월호 유역의 토양도를 구축하였다 (Fig. 4.3). 유역의 피복임상은 일부 산악지역 및 간사지 유역의 염분함유 토양을 제외하고는 얇은 사질의 사양토, 점질양토로 구성되어 있다. 산림은 침엽수가 대부분으로, 식생은 보통인 편이다. 또한, 토양은 적갈색의 점질토와 화강암 풍화토이며, 토심이 얇은 것으로 나타났다.

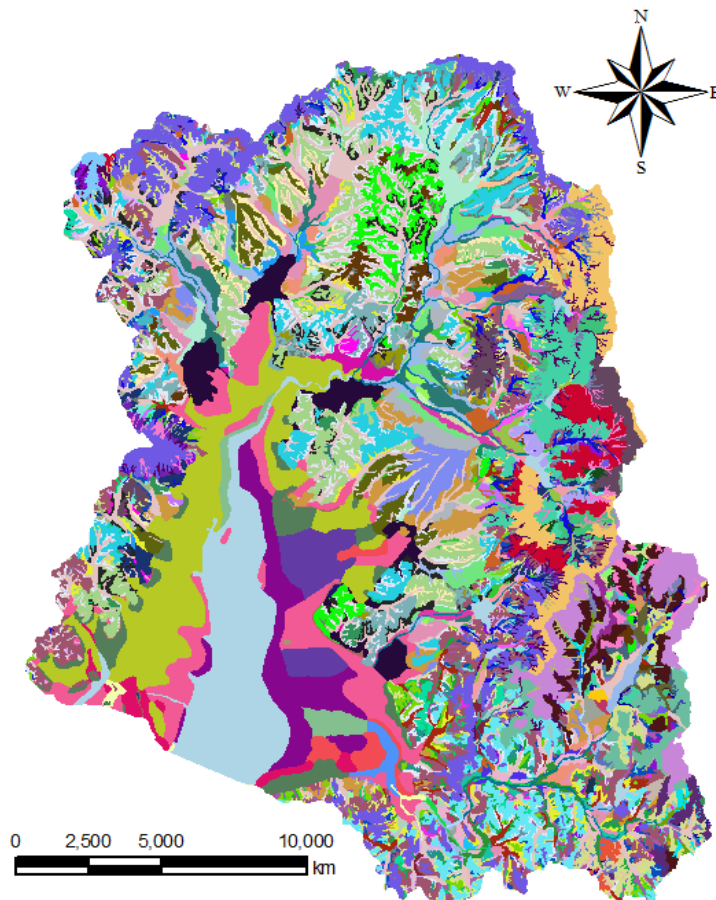


Fig. 4.3. Soil map of the Ganwol estuarine reservoir watershed

다. 토지이용도

환경부에서 제공하는 중분류 토지이용도 (2013)을 이용하여 간월호 유역의 토지이용도를 구축하였다 (Fig. 4.4). 유역내 토지이용 분포는 산지와 경지가 대부분이며, 기타 호와 수로, 대지, 도로 등으로 분포하고 있다. 전체 유역면적 48,770 ha중 39.6%가 논이고, 임야가 30.3%, 밭이 15.4%, 기타 8.8%, 수면 5.9%로 구성되어 있다.

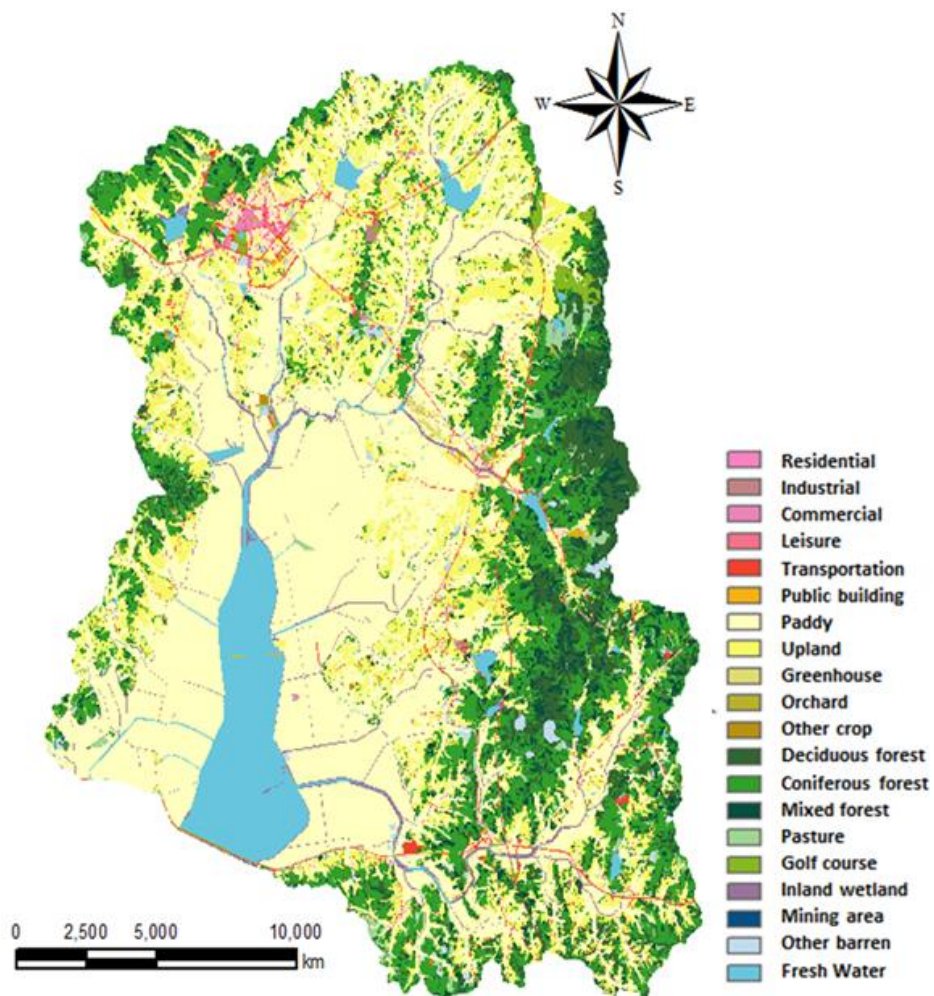


Fig. 4.4. Landuse map of the Ganwol estuarine reservoir watershed

라. 유입 하천

간월호로 유입되는 7개 하천 (야당천, 둔당천, 청지천, 도당천, 기포천, 소정천 및 와룡천)의 특성 자료를 구축하였다. Table 4.1은 7개 유입하천의 유역면적 및 유로장을 나타내고 있으며, 7개 하천에 대한 유역면적과 유로장의 합은 각각 321.89 km² 및 75.2 km로 나타났다.

Table 4.1. Characteristics of the streams in Ganwol estuarine reservoir watershed

Name of stream	Watershed area (km ²)	Stream length (km)
Yadang	15.6	3.5
Doondang	36.56	13.3
Chungji	42.23	11.0
Dodang	120.6	17.1
Gipo	8.7	4.8
Sojung	13.2	8.4
Waryong	85.0	17.1
Total	321.89	75.2

4.2 기상

간월호 유역의 기상자료를 수집하기 위하여 Thiessen망 분석을 통해 대표관측소로 서산 기상관측소를 선정하였으며, 1987년에서 2018년까지의 기온, 상대습도, 기압, 일사량, 평균운량, 강수량, 증발량, 풍향, 풍속 등의 자료를 구축하였다 (Fig. 4.5).

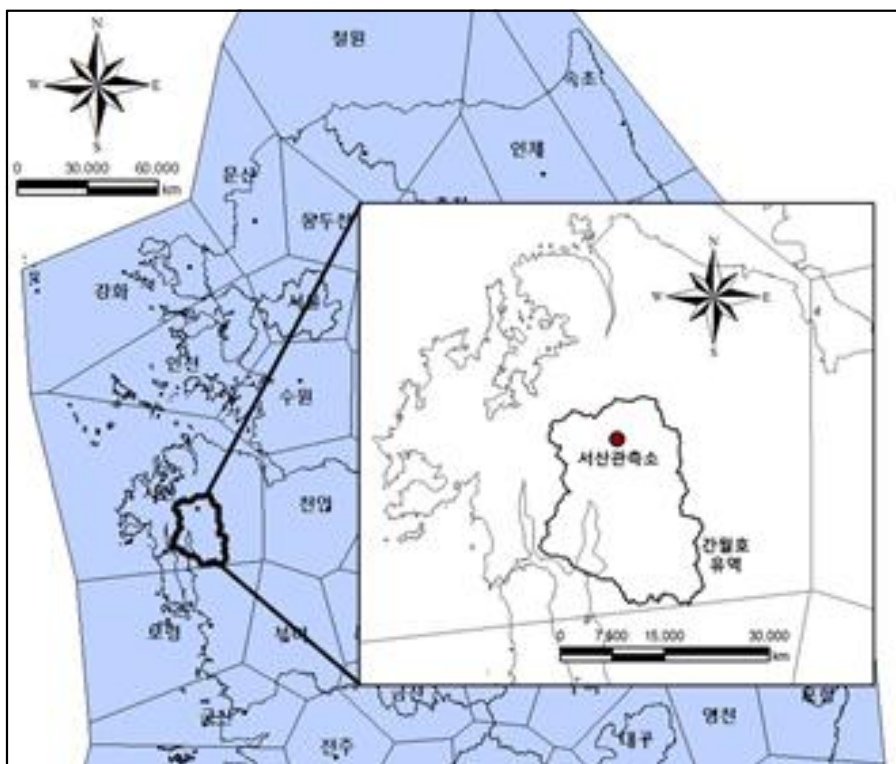


Fig. 4.5. Thiessen polygon analysis and location of Seosan weather station

일별 강수량 자료를 수집 결과, 1987년부터 2018년까지의 평균 연강수량은 1,262 mm로 나타났다. 이는 1987년부터 2018년까지 우리나라 연평균 강수량인 1,305 mm 보다 상대적으로 낮은 수치이다. 또한 본 연구에

서 호소 모형을 이용한 수질 모의 기간인 2015-2017년의 경우, 가뭄이 2013년부터 이어져 온 시기로, 강수량이 2015년 816 mm, 2016년 922 mm, 2017년 900 mm로 나타나 매우 적은 강수량을 기록하였다 (Fig. 4.6).

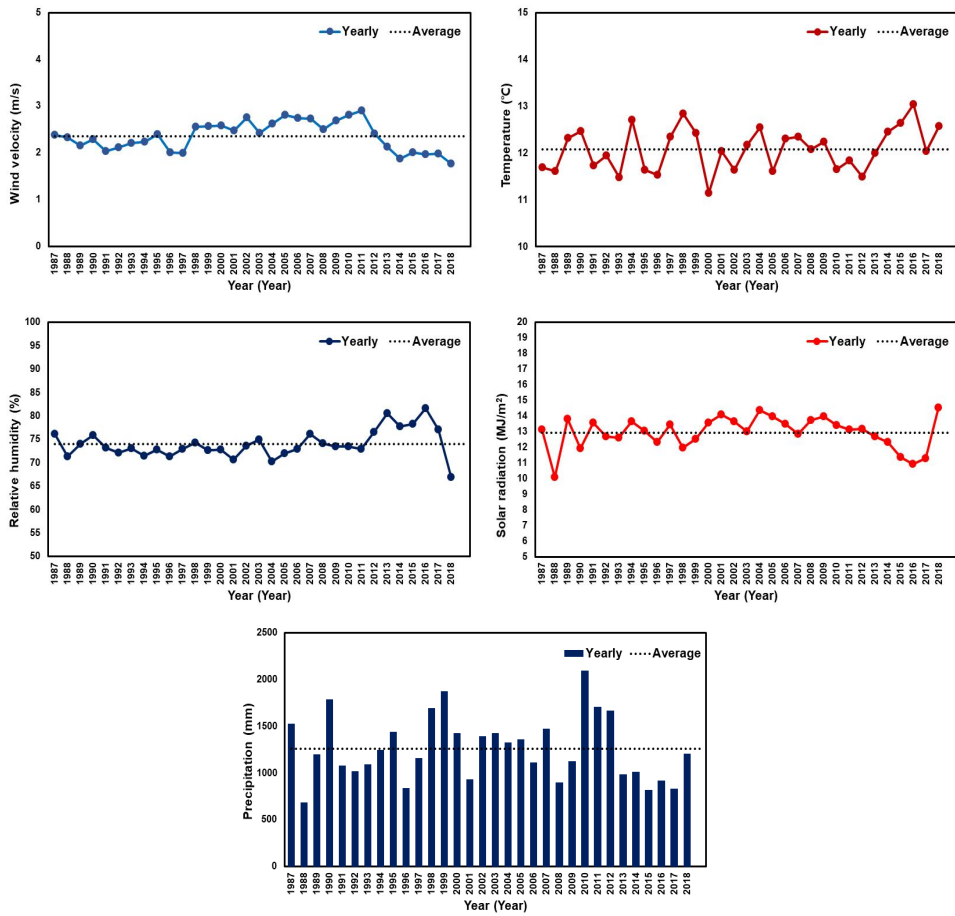


Fig. 4.6. Yearly mean weather data

4.3 유역 수문·수질 및 오염원

본 연구 유역 내에는 총 4개 하천 (도당천, 둔당천, 와룡천 및 청지천)에 각각 1개의 유량 및 수질 관측지점이 존재하며, 2011년부터 월 1회 측정된 자료를 수집하였다. 또한 유역 내 공공하수처리장 및 축산분뇨처리시설의 일별 방류량 및 수질 자료도 수집하여, 모형에 점오염원 입력자료로 활용하였다. 유량 및 수질 관측지점과 점오염원 시설 위치는 Fig. 4.7과 같다.

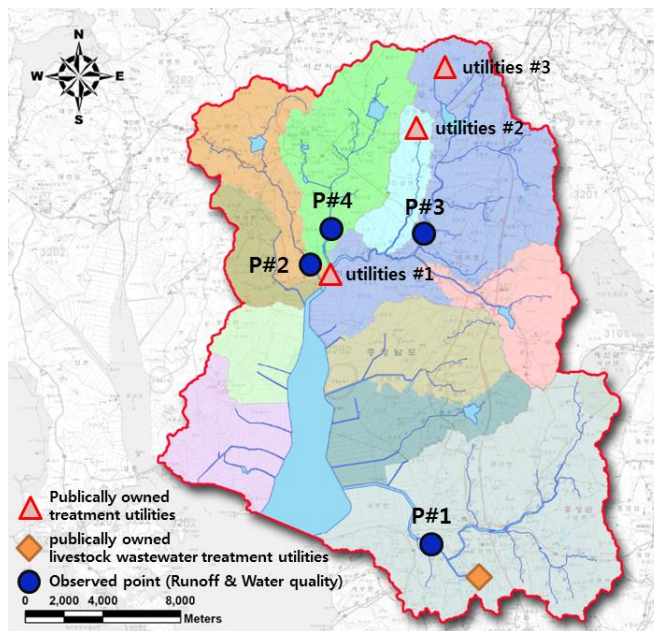
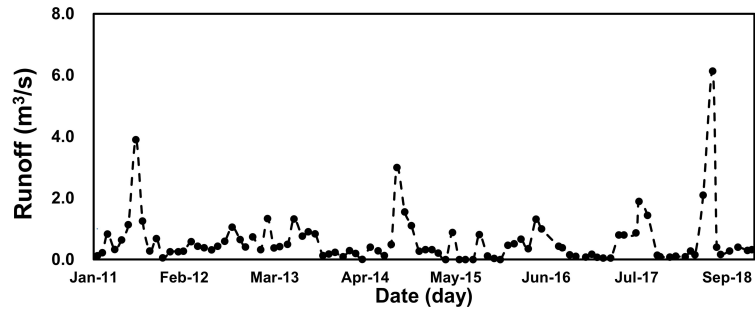


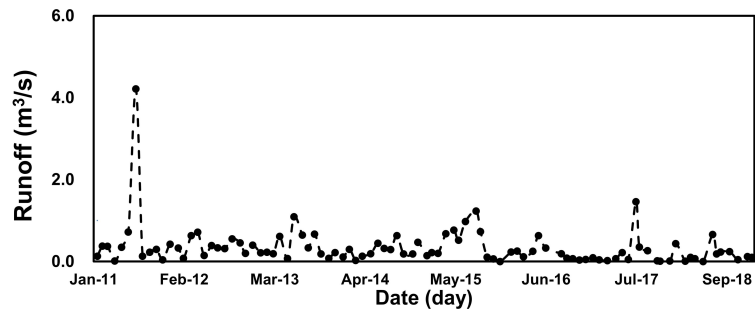
Fig. 4.7. Observed points of stream discharge and water quality

4.3.1 수문

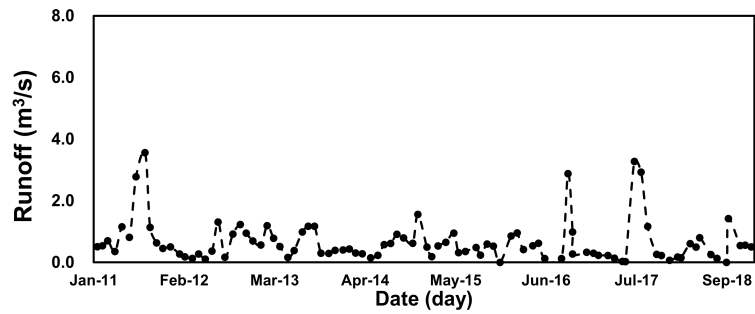
간월호의 유입하천인 도당천, 둔당천, 와룡천 및 청지천에 대한 유량 자료를 구축하였다 (Fig. 4.8). 자료기간은 2011년에서 2018년이고, 충청남도에서 월 1회 측정된 자료를 사용하였다.



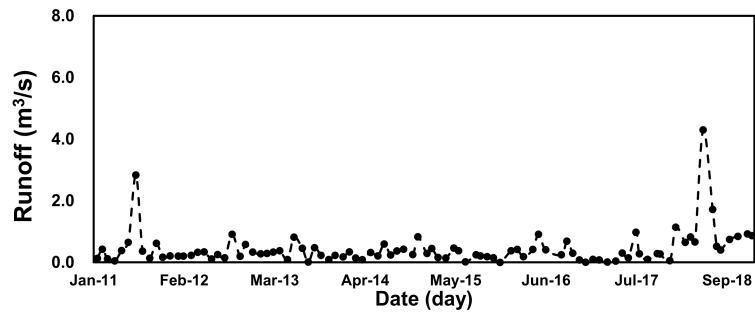
(a) Dodang



(b) Dundang



(c) Waryong

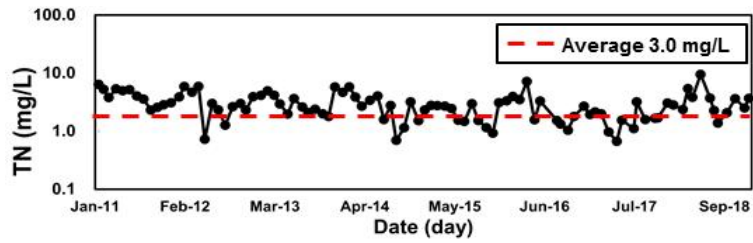


(d) Chungji

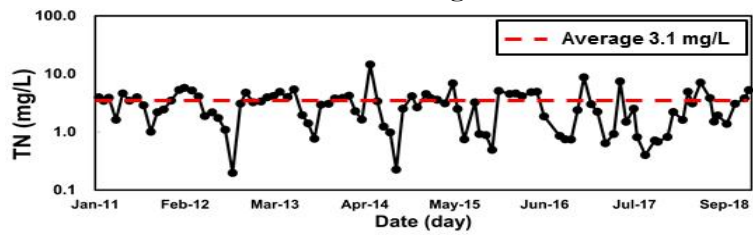
Fig. 4.8. Stream runoff data to the Ganwol estuarine reservoir

4.3.2 수질

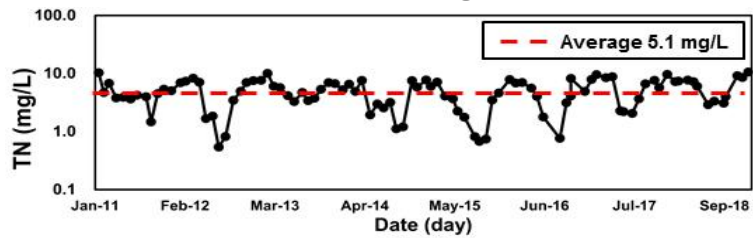
간월호의 유입하천인 도당천, 둔당천, 와룡천 및 청지천에 대한 T-N, T-P, SS 자료를 구축하였다 (Fig. 4.9-4.11). 자료기간은 2011년에서 2018년이고, 충청남도에서 월 1회 측정한 자료를 사용하였다.



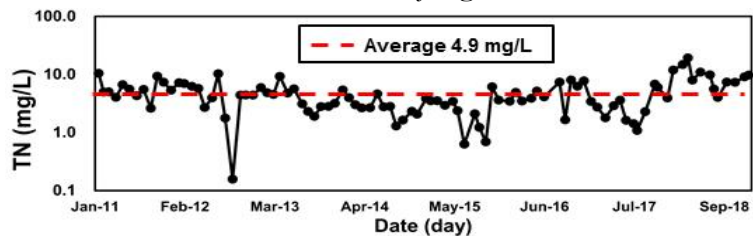
(a) Dodang



(b) Dundang

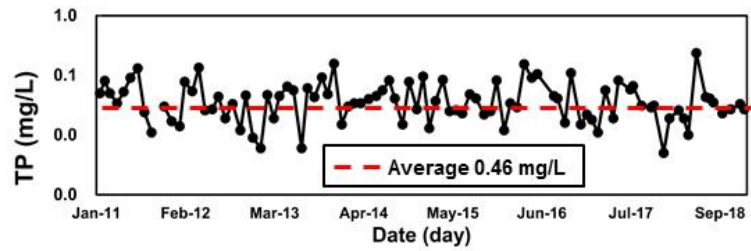


(c) Waryong

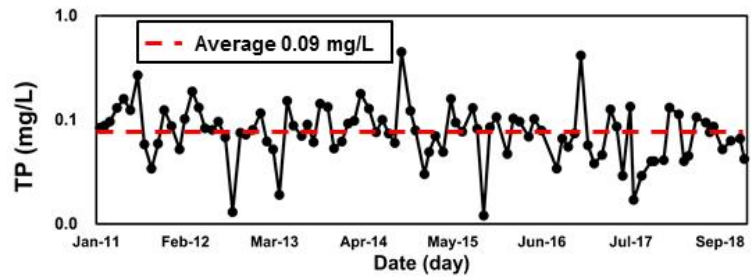


(d) Chungji

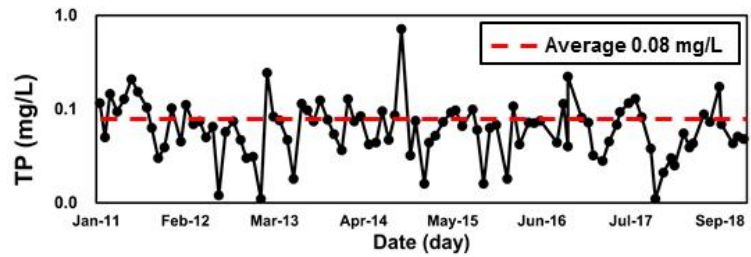
Fig. 4.9. Total nitrogen (T-N) concentration of inflow streams



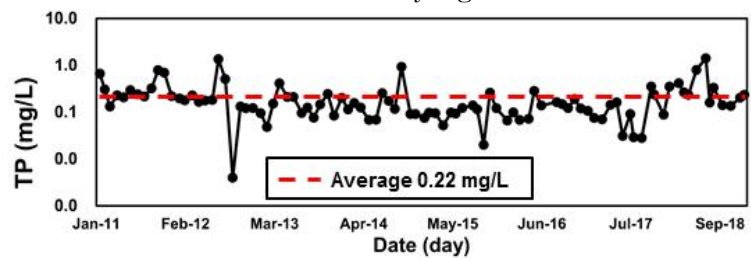
(a) Dodang



(b) Dundang

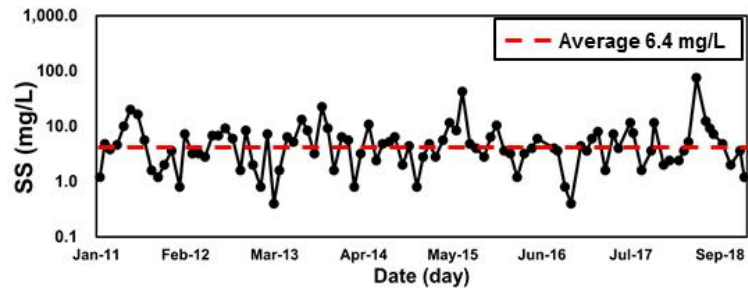


(c) Waryong

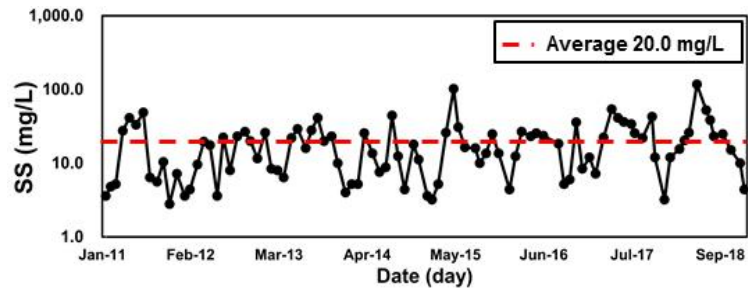


(d) Chungji

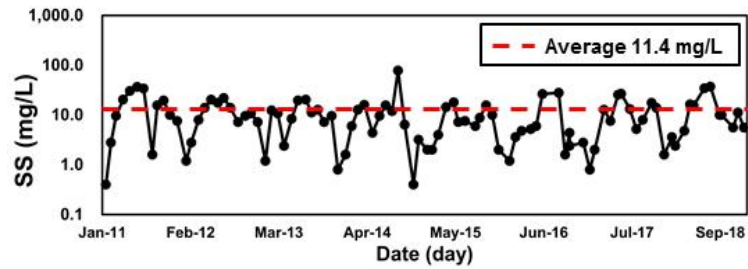
Fig. 4.10. Total phosphorus (T-P) concentration of inflow streams



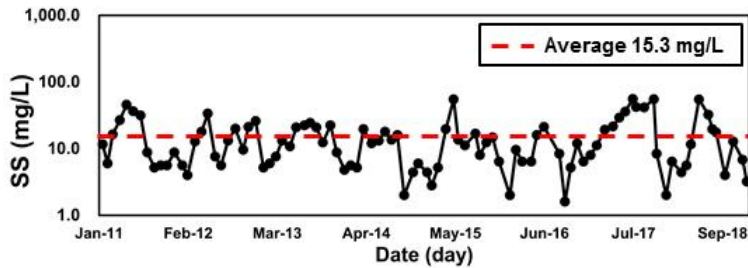
(a) Dodang



(b) Dundang



(c) Waryong



(d) Chungji

Fig. 4.11. Suspended Solids (SS) concentration of inflow streams

4.3.3 오염원

가. 하수처리장

점오염원으로 간월호 유역에 위치한 하수처리시설 방류수의 유량 및 수질 자료를 구축하였다. 간월호 유역에는 서산 공공하수처리시설, 음암 공공하수처리시설, 도당 공공하수처리시설 및 서산 분뇨처리시설이 위치하고 있다. 각 하수처리장의 일별 방류량 및 수질자료 (T-N, T-P, SS,)를 수집하였으며, 자료의 기간은 2008년에서 2017년까지이다. Fig. 4.12는 간월호 유역 내 주요 하수처리장의 위치를 나타내고 있으며, Fig. 4.13-4.15는 하수처리장별 수질 항목에 따른 연간 방류 평균 농도를 나타낸 것이다.

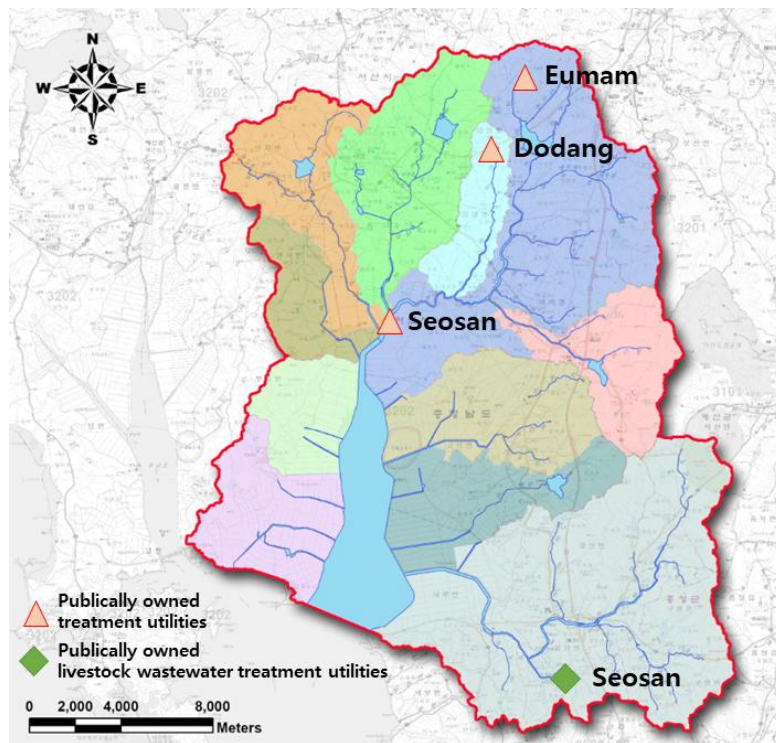


Fig. 4.12. Locations of public owned treatment utilities

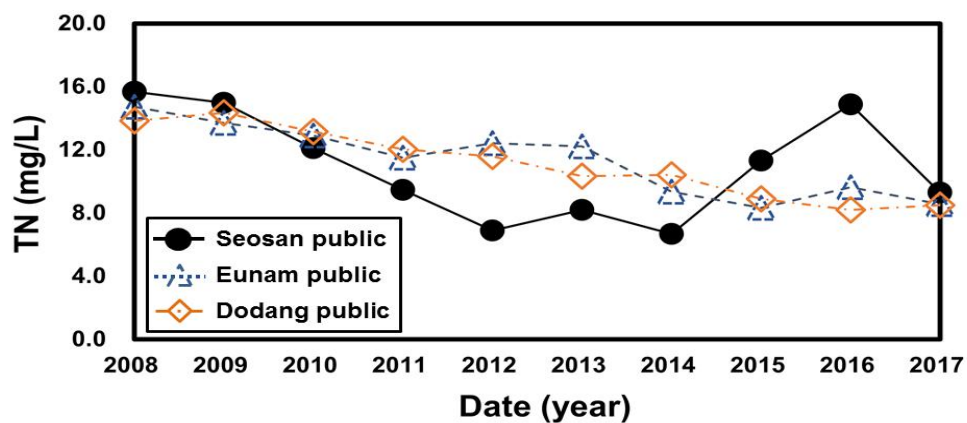


Fig. 4.13. Total nitrogen (T-N) concentration

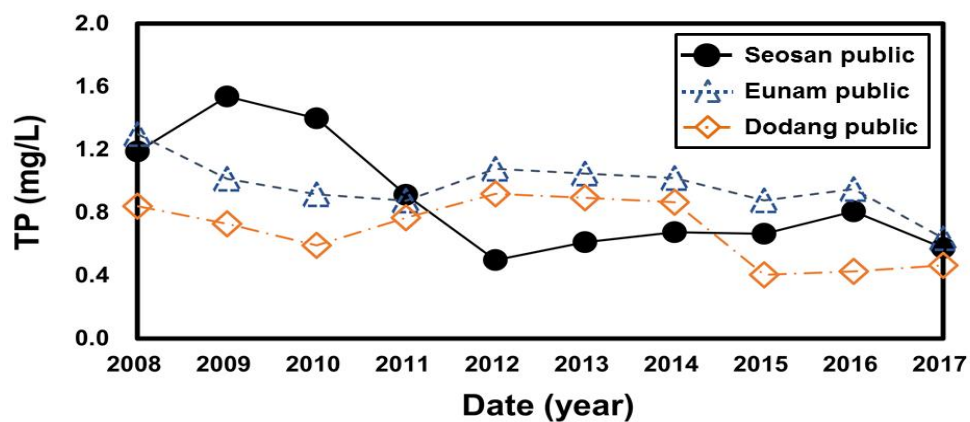


Fig. 4.14. Total phosphorus (T-P) concentration

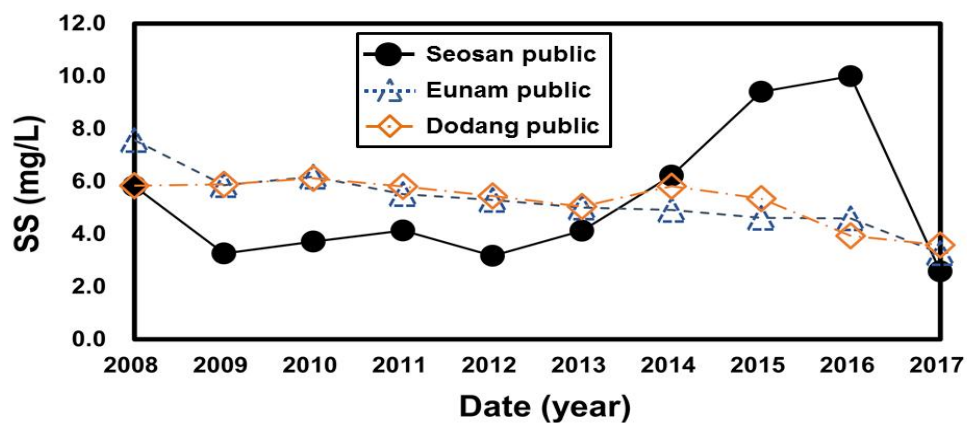


Fig. 4.15. Suspended Solids (SS) concentration

나. 시비량 및 퇴·액비

시비량은 논에서의 비점오염원 배출해석에 있어 관개량과 함께 중요한 요소 중 하나이다. 시비량은 홍성군의 2013-2015년 비료공급량 자료(통계청: <http://kosis.kr>)를 이용하였으며, 영농시에 농경지에 살포되는 시비량은 질소질 비료는 기비, 추비, 이삭비로 나누어 자료를 구축하였다. 인산질 비료는 기비 자료를 구축하였으며, 시비량은 각각 질소질 9.1 kg/10a, 인산질 2.5 kg/10a이다.

간월호 유역은 시비량뿐만 아니라 액비도 많이 뿌려지고 있어, 액비 살포량을 현장조사를 통해 조사하였다 (Fig. 4.16 및 Fig. 4.17). 유역 내 퇴비 및 액비 관리 및 사용실태를 파악하기 위해 총 4회에 걸쳐 간월호의 주변 지역 논에 대하여 퇴비 및 액비 살포 현황 조사를 실시하였으며, 조사결과 퇴비 및 액비 살포는 상당히 많은 논에서 이루어지고 있음을 확인하였다. 액비는 간척지 농경지 약 63.9%의 비율로 살포되는 것으로 나타났으며, 액비살포량은 단위면적당 21.57 ton/ha로 추정하였다.

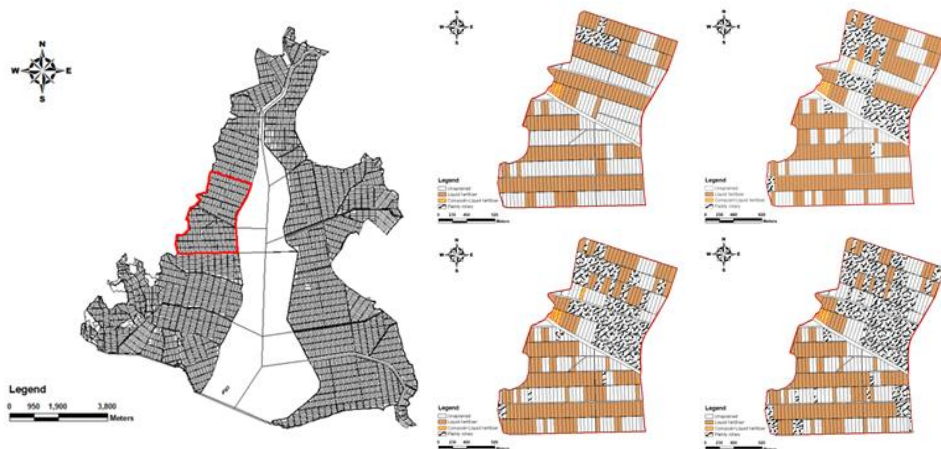


Fig. 4.16. Application status of liquid manure on the west side paddy fields of Ganwol estuarine reservoir

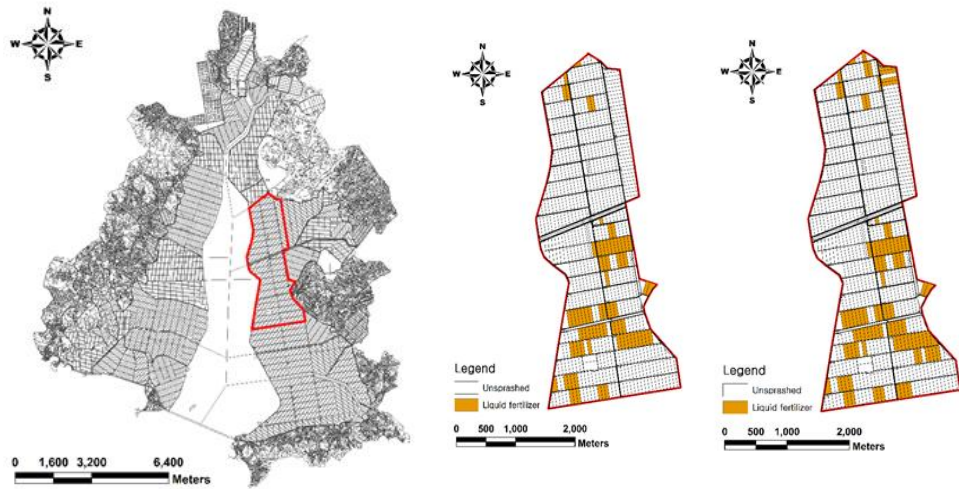


Fig. 4.17. Application status of liquid manure on paddy fields

간월호 유역의 영농 활동 및 비료 살포 시기를 Fig. 4.18과 같이 SWAT 모형에 반영하여, 수질 모의 정확도를 높이려고 하였다.

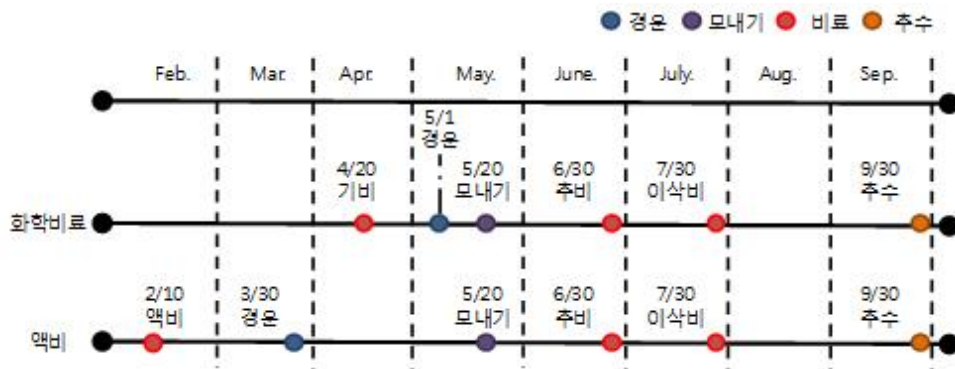


Fig. 4.18. Agricultural activity and fertilizing schedule

4.4 담수호 수위 및 수질 자료

4.4.1 담수호 수위 모의를 위한 자료 구축

간월호 유역에서는 유역 외부에서 들어오는 외부 유입수는 없으며, 간월호 내부의 양수장에서 취수하는 취수량을 유역 내 농업용수 관개량으로 이용하고 있다. 간월호 유역 내 양수장은 5개로 궁리양수장, 사기양수장, 석포양수장, 지산양수장, 간월양수장 등이 위치하고 있다. 실제 양수장 운영 자료는 2015-2017년까지 자료 수집이 가능하였으며, EFDC 모형의 수위 및 수질 모의에 이 기간에 대해서만 반영하였다. 2008년부터 2017년까지 양수장에서 취수되는 평균 취수량은 139,823 ton/yr이며, 지산양수장 43,164 ton/yr, 사기양수장 33,583 ton/yr, 궁리양수장 27,030 ton/yr 순으로 나타났다. 간월호의 양수장 위치는 Fig. 4.19와 같다.

또한 간월호의 경우 수위가 높아지는 시기 및 해양쪽의 조위가 낮아 호내와 호외부가 수위차가 클 때 배수갑문을 통한 방류를 실시하고 있으며, 호내 수위 자료는 배수갑문을 통한 방류 시기에만 측정하고 있으므로 본 자료를 수집하여, 수위 모의를 위한 보정에 활용하였다. 본 연구에서는 양수장 자료 기간인 2015년-2017년까지 방류 실적 및 수위 자료를 EFDC 모형에 반영하여 간월호 호내 물수지 및 수위 모의에 반영하였다.

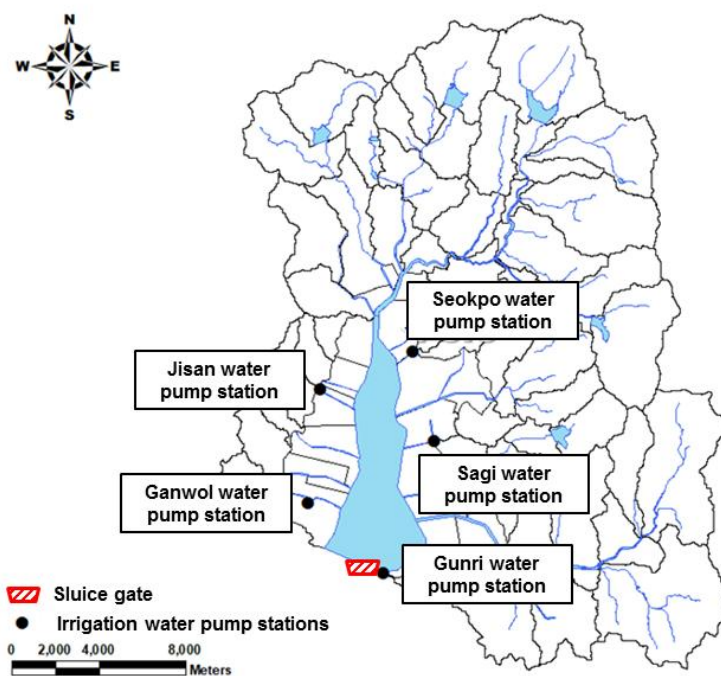


Fig. 4.19. Irrigation water pump stations in Ganwol watershed

4.4.2 담수호 수질 모의를 위한 자료 구축

가. 수질 자료 구축

간월호의 호내 수질 자료를 구축하였으며, 환경부에서는 간월호 내 3개 지점 (간월호1, 간월호2 및 간월호3)에 대해서 1997년 2월부터 매월 1회 수질 조사를 수행하고 있으며 그 위치는 Fig. 4.20과 같다.

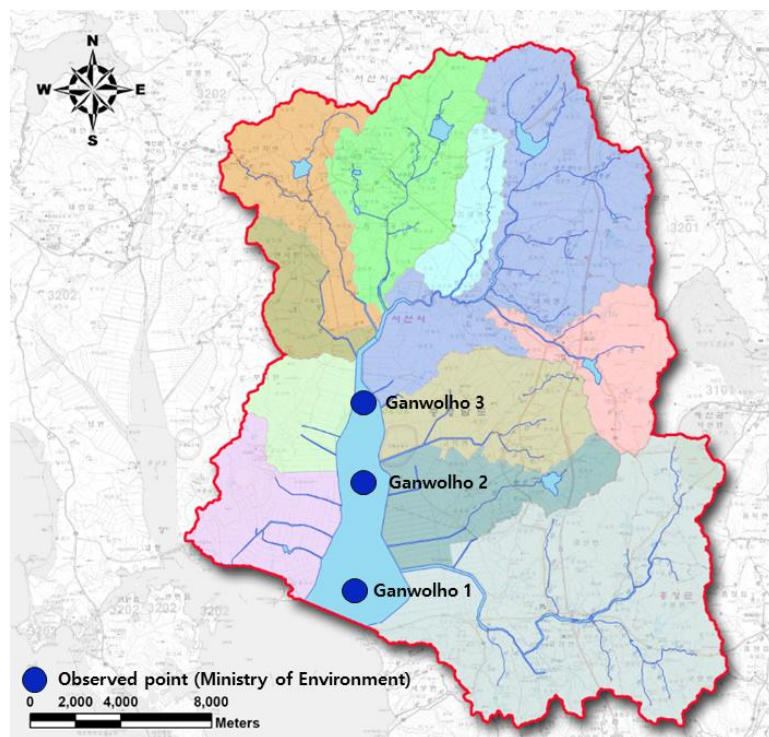


Fig. 4.20. Locations of monitoring points on Ganwol estuarine reservoir

간월호 1지점의 평균수질은 T-N 2.104 mg/L, T-P 0.085 mg/L 수준으로 나타났으며, 호소의 생활환경기준 IV등급 (약간나쁨)-VI등급 (매우나쁨) 수준이다 (Fig. 4.21, Fig. 4.22).

간월호 2지점의 평균수질은 T-N 2.392 mg/L, T-P 0.105 mg/L 수준으로 나타났으며, 호소의 생활환경기준 V등급 (나쁨) - VI등급 (매우나쁨) 수준으로 조사되었다. 간월호 1지점 대비 다소 높지만 전반적으로 유사한 수준의 수질을 보이고 있다.

간월호 3지점의 평균수질은 T-N 4.471 mg/L, T-P 0.262 mg/L 수준으로 나타났으며, 이는 호소의 생활환경기준 VI등급 (매우 나쁨) 수준이다. 간월호 3지점의 수질은 호내 측정지점 중 수질이 가장 높은 것으로 나타났으며, 이는 상류유역에서 유입되는 수질 및 저질의 오염물질의 축적에 따른 영향으로 보인다.

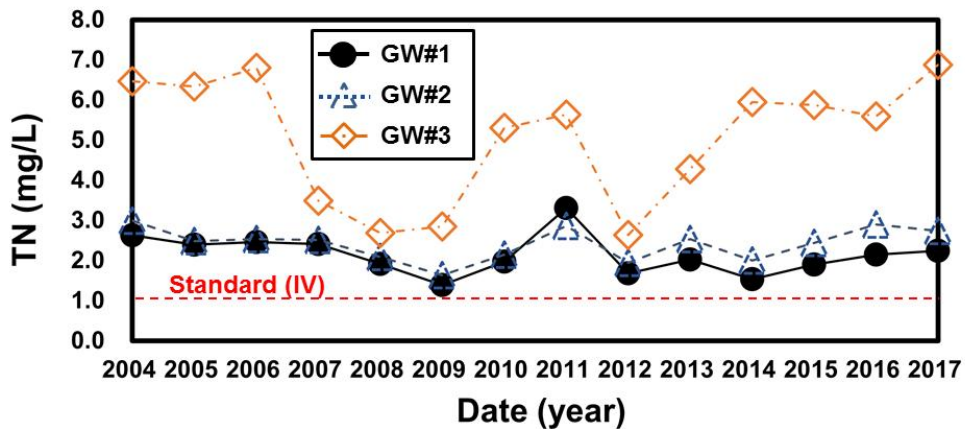


Fig. 4.21. Total nitrogen (T-N) concentration

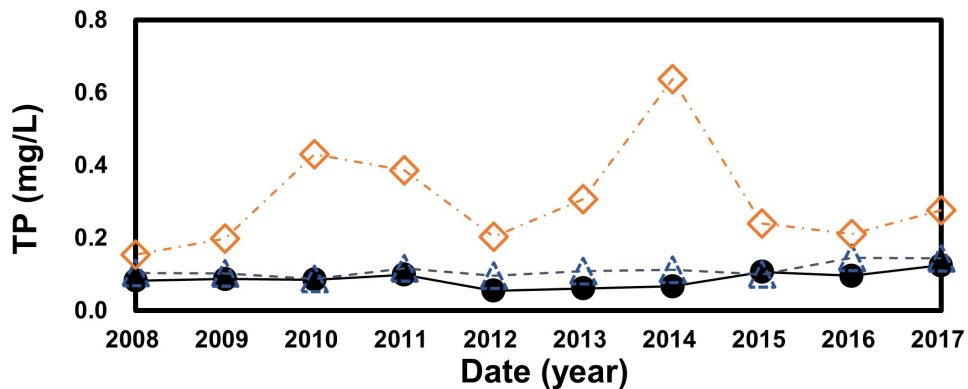


Fig. 4.22. Total phosphorus (T-P) concentration

나. 퇴적물 조사 및 용출실험

용출 실험을 위한 퇴적물 조사를 위해 간월호 3개 지점에서 Grap sampler를 사용하여 채취하였다. 용출 실험에 앞서 채취한 퇴적물에 대해서는 강열감량, 유기물함량, T-N, T-P, Cd, Cu, Pb, As, Cr6+와 체분석을 통해 퇴적물의 물리 화학적 분석을 실시하였다. Table 4.2는 퇴적물에 대한 오염도 분석 결과를 나타낸 것이다. 분석 결과, 휘발성 유기물의 총량을 평가할 수 있는 강열감량, T-N, T-P 모두 하류부 (간월호 1, 간월호 2)보다 상류부 (간월호 3)의 값이 높게 나타났다. 강열감량은 평균적으로 1.4%, T-N은 0.085 mg/kg, T-P는 453.01 mg/kg으로 나타났다.

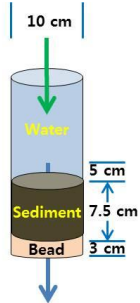
국내·외 보고된 퇴적물의 오염도 분석 결과와 비교해 보면, 마산만의 경우, 강열감량 12.9%, T-P 479 mg/kg (박동규, 1995), 진해만의 경우, 강열감량 11.8%, T-P 376 mg/kg (박동규, 1995), 팔당호의 경우, 강열감량 0.1 - 20.2%, T-N 20-2,200 mg/kg, T-P 214-1,625 mg/kg (정용준, 2006), 화성호의 경우, 강열감량 9.9 - 12.4%, T-N 7,313-8,161 mg/kg, T-P 295-353 mg/kg (최이송 외, 2011) 등으로 조사되어 간월호의 오염도가 강열감량은 낮았지만 T-P는 높게 나타났다. 대부분의 퇴적물 오염도 평가결과 상류부인 간월호 3지점이 간월호 1 및 2지점보다 높은 수준으로 나타났으며, 유입지천에서 유입되는 오염원에 영향을 많이 받았기 때문이다.

Table 4.2. Soil characteristics

Sampling date	Points	Ignition Loss (%)	Organic matter (%)	T-N (%)	T-P (mg/kg)
18-05-24	GW1	0.9	0.25	0.042	385.88
	GW2	0.8	0.50	0.058	448.03
	GW3	3.7	2.10	0.154	607.46
18-07-13	GW1	0.4	1.36	0.102	409.50
	GW2	0.6	0.99	0.073	417.13
	GW3	2.1	1.20	0.081	450.03
Ave.		1.4	1.07	0.085	453.01

대상지역에서 채취한 퇴적토를 풍건 후 2 mm 체 선별한 토양을 지름 10 cm, 높이 44 cm의 컬럼에 충전한 후 채수한 현장 저층수로 포화시켜 담수 환경을 조성한 다음 시간에 따른 수질 농도변화를 측정하였다. 현장 조건 중 호기 및 혐기 조건을 모의하기 위해, 호기성 조건은 DO의 일정 농도가 유지되도록 폭기 장치를 이용하였으며, 혐기조건은 알루미늄 호일로 컬럼 외부를 감싸 빛을 차단하는 동시에 질소가스를 계속 주입하여 혐기상태를 유지하였다. 컬럼 시험은 정광욱 등 (2014)의 연구에서 사용한 컬럼 규격을 약 절반으로 수정하여 진행하였다. 채취한 수질 시료의 분석은 수질오염공정시험기준에 따라 수행하였으며, 자세한 컬럼의 제원 및 시험절차는 Table 4.3 및 Fig. 4.23과 같다.

Table 4.3. Details of the column-leaching test

Category	Details	Column
Column specifications and settings	Diameter = 10 cm, height = 44 cm; filled with mixed soil (grain size <2 mm) up to a height of 20 cm (total height = 44 cm); flow rate = 0.91 mL/min and 2 pore volumes (PVs) daily	
Sampling	Sampling interval: 0 day, 0.5 day, 1 day Duration of experiment: 10 days Sampling point: 5 cm (from column upper)	
Content	T-N, T-P, NH ₃ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, PO ₄ -P	

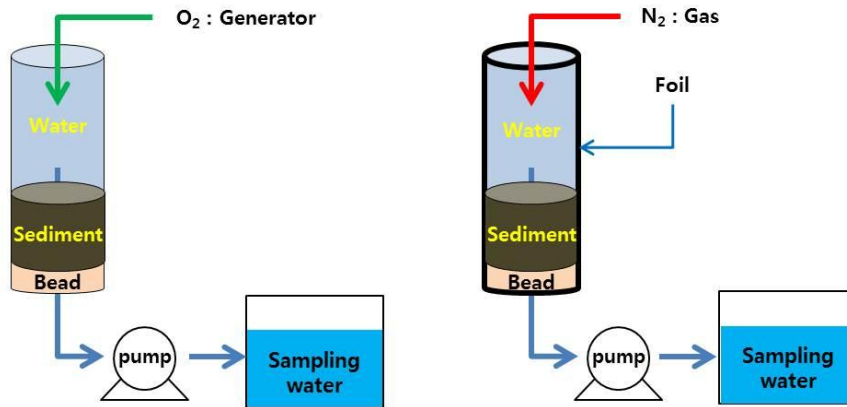


Fig. 4.23. Diagram of the column-leaching test

채수한 수질시료는 우리나라 수질오염공정시험기준에 준하여 분석하였다. 총질소 (T-N)와 총인 (T-P)은 연속자동측정방법 (각 ES 04908.1c, ES 04907.1e)을 이용하여 연속흐름분석기 (SAN++, Skalar, Netherlands)로 정량하였다. 암모니아성 질소 (NH₃-N)는 자외선/가시선 분광법 (ES 04355.1c)을 이용하여 시료 적당량에 산화마그네슘 0.3g을 넣고 증류한 전처리 시료 일부를 취하여 나트륨 페놀라이트용액 (12.5%)과 나이트로플루시드나트륨용액 (0.15%), 하이포염소산나트륨용액 (1 %)을 순서대로 넣고 30분간 방치한 후 자외선/가시선분광기 (Cary 60, Agilent Technologies, USA)로 측정하였다. 음이온 (NO₂-N, NO₃-N, PO₄-P)은 이온크로마토그래피법 (각 ES 04354.2a, ES 04361.1a, ES 04360.3a)을 이용하여 이온크로마토그래피 (Dionex ICS-5000+, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)로 정량하였다. 간월호 호내의 퇴적물에 존재하는 오염물질의 용출에 대한 조사를 수행하기 위하여, 2019년 5월과 2019년 7월 2회에 걸쳐 퇴적물 및 채수를 수행하였다. 오염물질 조사 항목은 NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, PO₄-P, T-P, T-N이며, 5월, 7월 2회의 분석을 통해 실험의 재현성과 더불어 시기별 용출 정도의 차이를 보고자 하였다.

Fig. 4.24-4.26과 Table 4.4는 T-P, T-N의 오염물질 항목에 대해 간

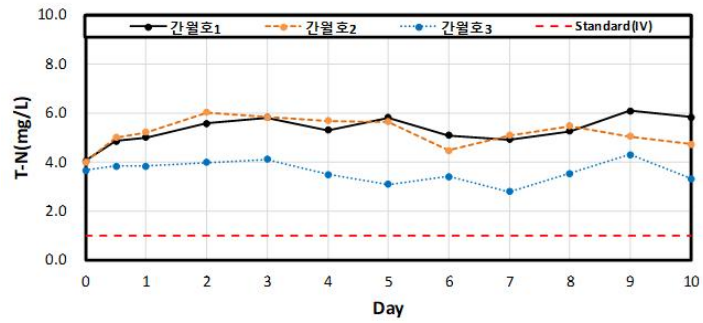
월호 채취 지점별로 호기성과 혐기성 용출 실험결과를 나타낸 것이다. T-P 실험 결과, 간월호 1지점의 호기성 실험에서 평균적으로 0.150 mg/L, 혐기성 실험에서 0.199 mg/L의 결과를 보였다. 간월호 2지점의 호기성 실험에서 평균적으로 0.148 mg/L, 혐기성 실험에서 0.192 mg/L의 결과를 보였다. 간월호 3지점의 호기성 실험에서 평균적으로 0.175 mg/L, 혐기성 실험에서 0.356 mg/L의 결과를 보였다. 특히 3번 지점의 경우, 호소수 수질 환경 기준 4등급보다 높은 수준의 T-P 수질 농도 결과를 보이고 있다. 또한 간월호 2, 3 지점에서 호기성, 혐기성 상태에서 모두 PO₄-P의 용출이 큰 것으로 나타났는데, 이는 유역으로부터 유입이 없다고 하더라도 현재 퇴적물의 P-계열의 용출이 높은 농도로 지속적으로 이루어지고 있을 우려가 있음을 나타낸다.

T-N 실험 결과, 간월호 1지점의 호기성 실험에서 평균적으로 5.5 mg/L, 혐기성 실험에서 3.6 mg/L의 결과를 보였다. 간월호 2지점의 호기성 실험에서 평균적으로 2.8 mg/L, 혐기성 실험에서 2.8 mg/L의 결과를 보였다. 간월호 3지점의 호기성 실험에서 평균적으로 3.5 mg/L, 혐기성 실험에서 2.8 mg/L의 결과를 보였다. 세 지점 모두 모든 실험 기간동안 호소수 수질 환경 기준 4등급 기준을 초과하고 있었으므로 유역으로부터의 질소 유입이 없다 하더라도 이미 용출로 인한 N-계열 용출이 높은 수준을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히, 간월호 1번 지점의 경우 T-N 농도뿐만 아니라 NH₄-N의 용출 농도가 높게 나타났는데, 이는 간월호 1번 지점의 경우 농경지로부터 유입되어 퇴적된 퇴적물에서 가축분 퇴액비로 인한 오염이 우려된다.

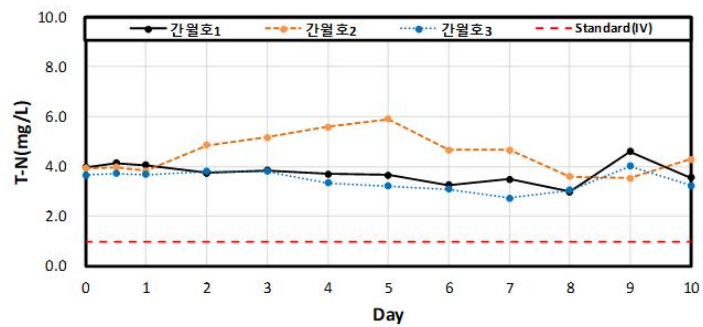
Table 4.4. Column test results

Item		Aerobic			Anaerobic		
		GW1	GW2	GW3	GW1	GW2	GW3
T-P	Test#1	0.156	0.184	0.164	0.178	0.186	0.362
	Test#2	0.143	0.127	0.116	0.219	0.234	0.479
	Test#3	-	0.132	0.244	-	0.155	0.228
	Ave.	0.150	0.148	0.175	0.199	0.192	0.356
T-N	Test#1	5.4	3.7	5.3	4.6	3.6	3.4
	Test#2	5.6	2.4	2.2	2.5	2.4	2.7
	Test#3	-	2.2	2.9	-	2.3	2.4
	Ave.	5.5	2.8	3.5	3.6	2.8	2.8

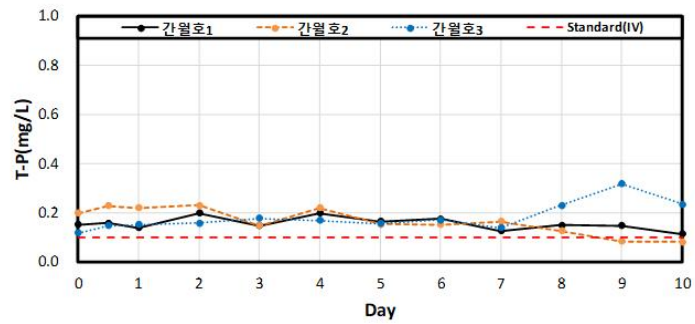
Aerobic



Anaerobic



Aerobic



Anaerobic

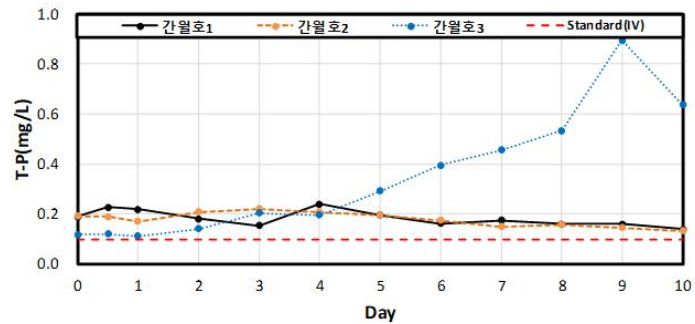
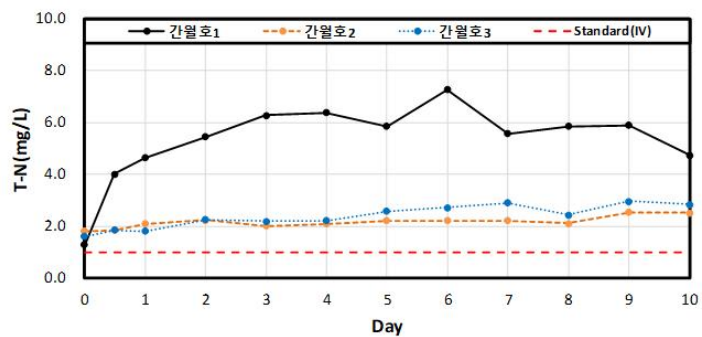
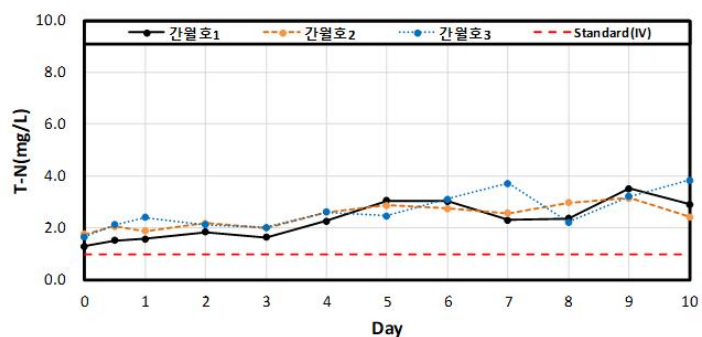


Fig. 4.24. Column test results (test#1)

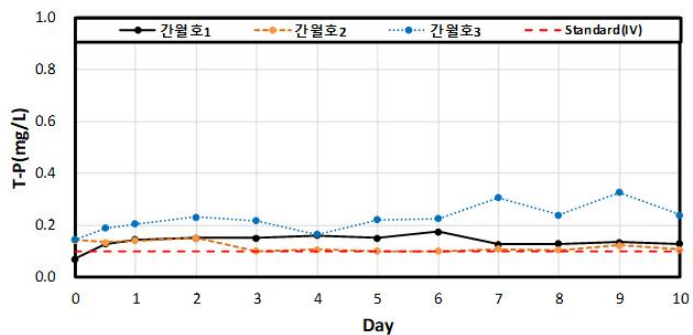
Aerobic



Anaerobic



Aerobic



Anaerobic

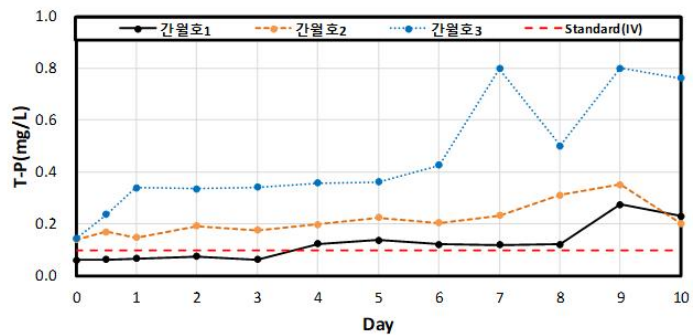
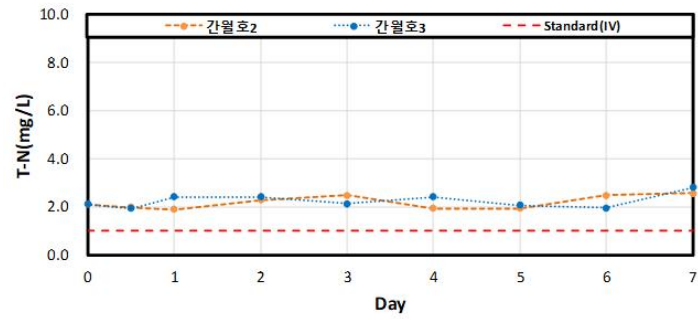
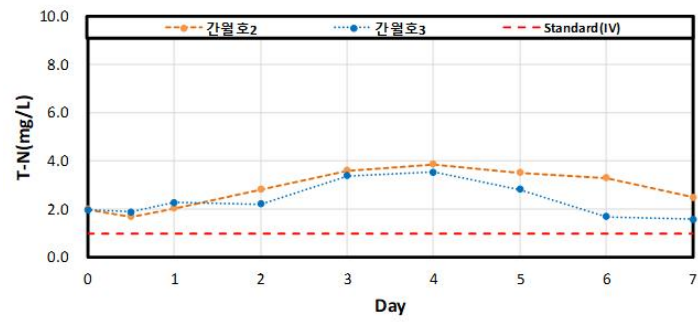


Fig. 4.25. Column test results (test#2)

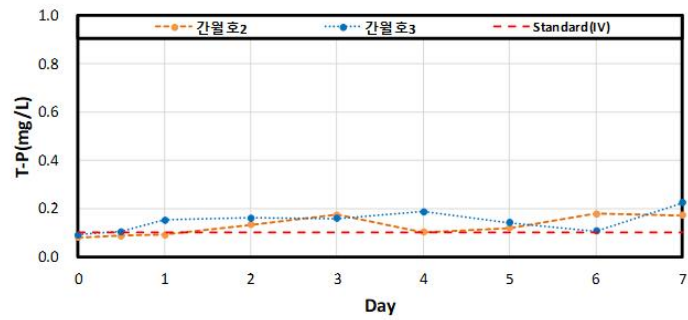
Aerobic



Anaerobic



Aerobic



Anaerobic

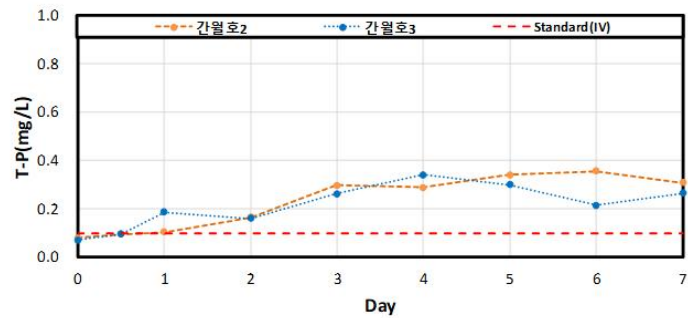


Fig. 4.26. Column test results (test#3)

제 5 장 SWAT-EFDC 연계모형을 이용한 담수호 유역 수문 해석

5.1 SWAT 모형을 이용한 담수호 유역 수문·수질 모의

SWAT 모형을 이용한 대상 유역에 대한 수문해석을 함에 있어서 수문반응단위 (HRU)의 개수가 적을수록 해석이 용이 (혹은 바람직, desirable)하나 소유역별로 별도의 유역 관리 기법 (watershed management practices)의 적용을 위해서는 불가피하게 HRU의 개수를 사용자의 수문 해석 용도에 맞게 구성해야 하며 (Kalcic et al., 2015), 본 연구에서는 간월호 상류 유역을 크게 6개의 소유역으로 구분하여 SWAT 모형을 이용한 수문해석을 수행하였다.

Fig. 5.1은 연구대상지를 소유역별로 구분하여 나타낸 것이며, 본 연구의 대상지 6개의 소유역 중에서 4개 유역은 충청남도보건환경연구원에서 [충청남도 모니터링 사업]의 일환으로 수행된 계측 자료가 존재하는 유역이며, 본 연구에서는 유량 및 TN (Total Nitrogen), TP (Total Phosphorus) 자료를 활용하였다. 나머지 2개 유역은 간월호 주변에 위치한 간척농경지로서, 유역 평균경사가 낮아 간월호의 수위 변화에 영향을 받는 지역으로 유량의 계측이 어려움이 있는 지역이다. 따라서 2개 유역의 경우, 타 연구를 참조하여 평야지의 농경지 우점 유역 모의에 대표적인 매개변수를 인용하고, 본 연구 인근 대상지의 매개변수를 참조하여 유출량 및 수질 모의에 이용하였다.

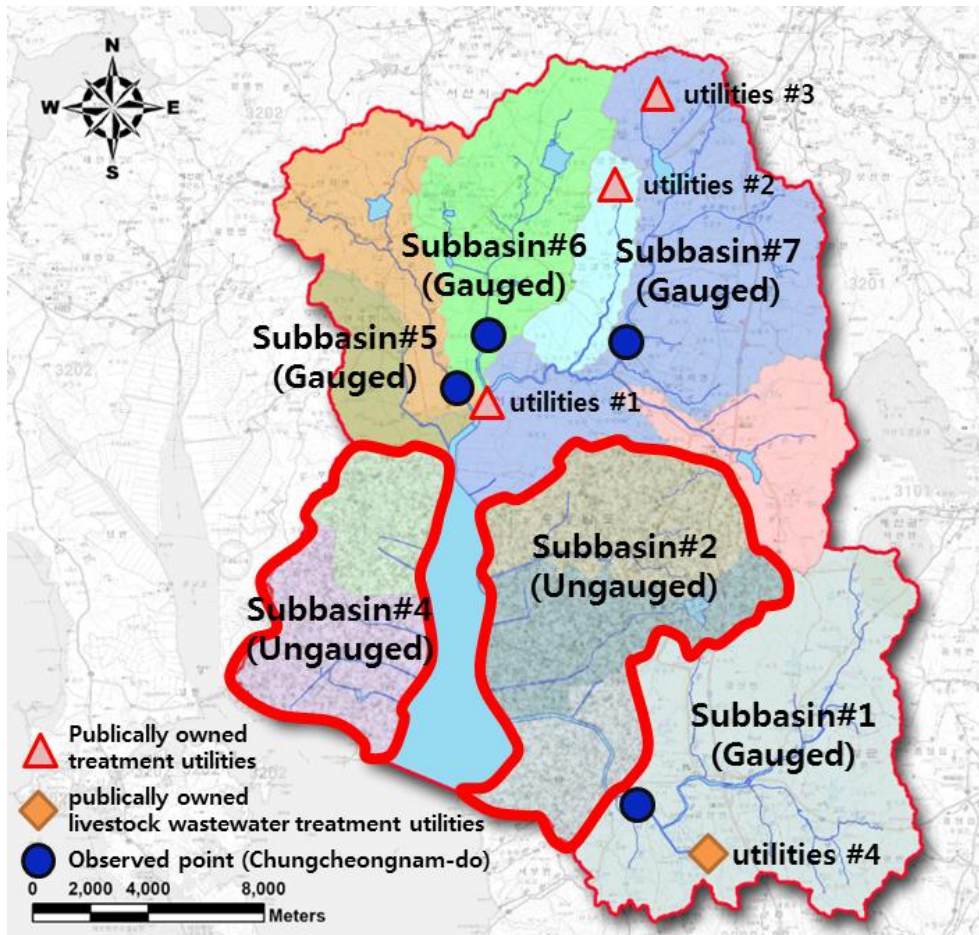


Fig. 5.1. Spatial distribution of subbasin, treatment utilities and observed point (runoff and water quality)

5.1.1 SWAT 모형을 이용한 유출량 모의 및 보·검정

본 연구에서는 SWAT 모형을 이용한 담수호 상류 유역의 소유역별 유출량 모의를 수행하였으며, 1987년 1월부터 2018년 12월까지 총 32년에 대해 모의하였다. SWAT 모형의 유출량 해석을 위하여 서산기상관측소에서 강우, 상대습도, 일사량, 풍속, 온도, 이슬점온도 자료를 수집하였으며, 수집된 기상자료는 기상발생기 (weather generator)를 통해 SWAT 모형의 입력자료로 구성하였다. 유출량의 보·검정을 위하여, 2011년부터 2018년까지 충청남도보건환경연구원에서 [충청남도 모니터링 사업]의 성과로 조사한 월 1회 조사를 통해 계측된 일유출량 조사 자료를 이용하였다. Table 5.1은 SWAT 모형에 이용되는 기상 변수를 나타낸다.

본 연구에서는 기상 자료 및 지형자료를 기반으로 지표면 유출 (surface runoff), 증발산량 (evapotranspiration), 침투량 (infiltration), 회귀수량 (return flow 혹은 base flow)을 산정하였으며, 본 연구에서는 서산기상대의 1987년-2018년 (30년)의 일별 기상자료를 이용하였다.

Table 5.1. Weather data type and source for SWAT model

Data	Type	Source
Rainfall	Daily sum (mm)	Seosan (KMA ^a)
Temperature	Daily minimum and daily maximum ($^{\circ}C$)	
Wind velocity	Daily average (m/s)	
Relative humid	Daily average (%)	
Dew-point temperature	Daily ($^{\circ}C$)	
Solar radiation	Daily sum (MJ/m^2)	

a Korea Meteorological Administration

SWAT 모형에서 사용자가 선택할 수 있는 각 독립변수별 해석 기법은 아래와 Table 5.2와 같다.

Table 5.2. Method options for calculating each variable in SWAT model

Variable	Method
Surface runoff	NRCS/Daily route
	G&A hourly route
Evapotranspiration	Priestly-taylor
	Penman/Monteith
	Hargreaves
	Read actual PET file
Channel routing	Variable storage
	Muskingum

본 연구에서 담수호 상류 유역의 수문해석에 필요한 요소를 산정하기 위해 아래와 같은 알고리즘 및 고려사항을 검토하였으며, ①-④ 까지 수문 해석 요소별 주요 내용에 대해 상세히 기술하였다.

- ① 본 연구에서는 지표면 유출을 계산하기 위하여, NRCS 유출곡선법을 선택하였으며, 논과 산림을 제외한 토지이용의 경우 SWAT에서 기본적으로 제공하는 CN 값을 이용하였고, 단 논인 경우는 우리나라 논 유출 재현성을 높이기 위하여 임상준 (1995)의 연구를 참조하여 CN 값을 98로 고정하여 이용하였다.
- ② 증발산량은 수문 순환 (Kang et al., 2009; Jung et al., 2014) 및 수문 모형 (Andréassian et al., 2004; Vicente-Serrano et al., 2014; Li et

al., 2018)의 해석에서 매우 중요한데, 일반적으로 국내외 유출량 해석에서 주로 Penman-monteith를 이용한 방법을 주로 이용하고 있다. 본 연구에서도 역시 Penman-monteith를 채택하였다. 최근에는 앞서 기술한 바 있는 유출량 해석의 불확실성을 줄이기 위하여, 토양수분 위성 영상 자료와 자료동화 기법을 이용하여 연구하고 있는 바와 같이, 증발산량 관측자료가 아닌 증발산량 산정식이 가지는 불확실성을 줄이기 위하여 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성영상에서 제공하는 8일 간격의 증발산량 자료(8-day total actual evapotranspiration, AET)와 자료동화 기법(data assimilation method)을 이용하여 SWAT 모형의 모의 불확실성을 줄이기 위한 연구도 진행되고 있다 (Rajip et al., 2018).

- ③ 그 외 침투, 측방유출량, 지하수 모의의 경우, SWAT에서 제공하는 알고리즘을 기반으로 산정하였으며, 각 유출량 요소의 경우 본 대상유역에서 실제 측정한 자료를 구하기가 어려워 각각의 요소 산정을 위한 매개변수는 수문 모의의 정확도를 높이기 위한 보정 (calibration) 자료로 활용하였다.
- ④ 본 연구에서 보·검정을 위한 목적함수는 R^2 , RMSE (root mean square error), P-BIAS, NSE 값을 이용하였다 (Moriassi et al., 2015).

나. 소유역별 보정 및 유출량 특성 분석 결과

본 연구에서는 SWAT 모형의 유출량을 보정하기 위하여 시행착오법을 수행하였으며, 2014-2018년의 자료에 대하여 보정, 2011-2013년 자료에 대해 검정을 수행하였다. 간월호 상류 유역을 분할하여 각 유역마다 매개변수를 보·검정하였으며 (Fig. 5.2), 소유역별 매개변수 보·검정 결과는 아래와 같다.

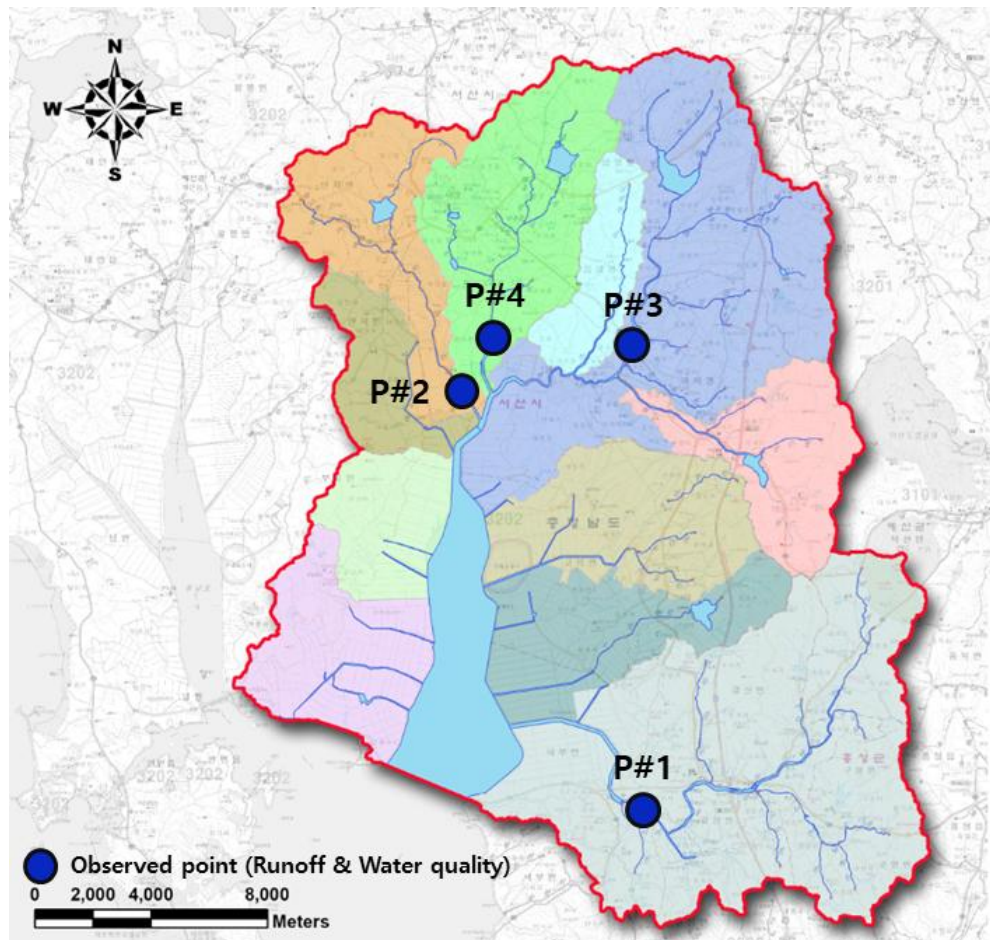


Fig. 5.2. Observed point of runoff and water quality data

Table 5.3. List of calibration parameters for daily runoff simulation for the Chungji watershed

File	Parameter	Definition	Range	Default Value	Calibrated
.gw	ALPHA BF	Baseflow alpha factor	0.0-1.0	0.048	0.70
.gw	ALPHA_BF_D	Alpha factor for groundwater recession curve of the deep aquifer (1/days)		0.01	0.70
.gw	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	0.0-5,000	1000	5000
.gw	GW REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02-0.2	0.02	0.02
.bsn	SURLAG	Surface runoff lag coefficient	1-12	4	12
.hru	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.0~1.0	0.95	0.95

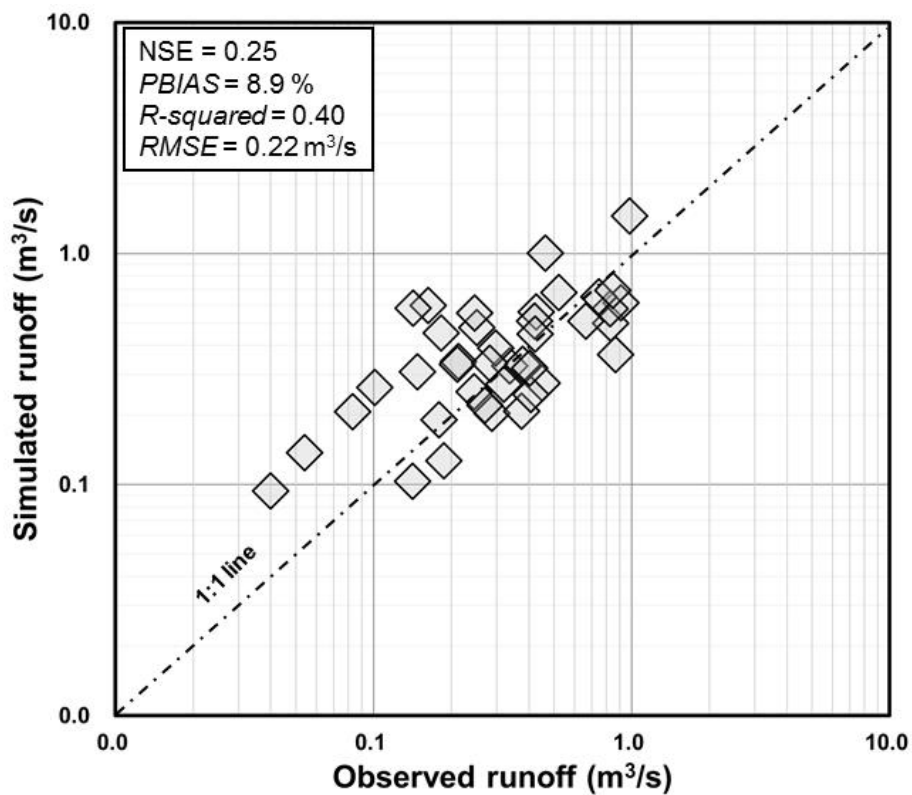


Fig. 5.3. Schematic of 1:1 line of observed and simulated runoff (CJ)

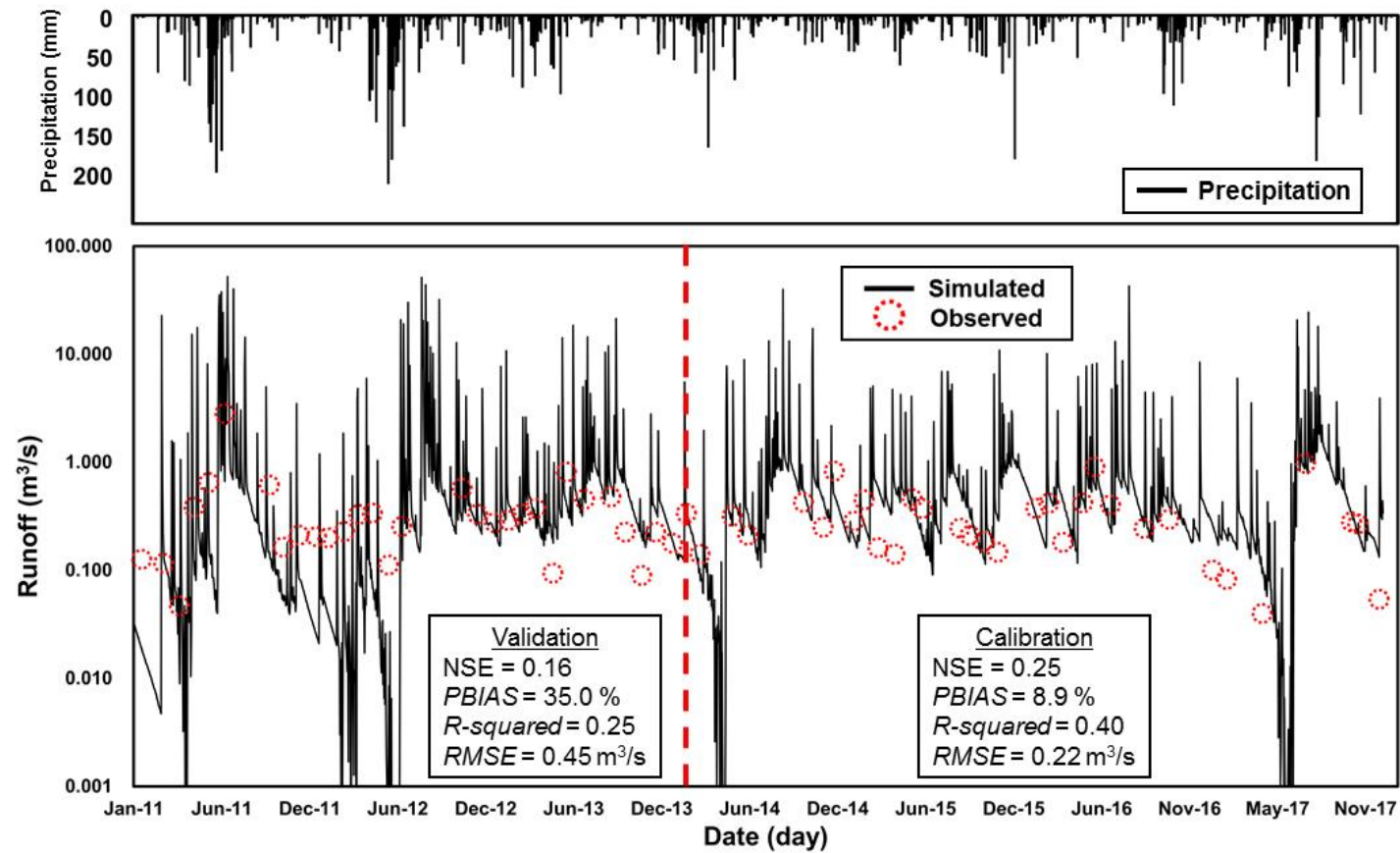


Fig. 5.4. Schematic of observed and simulated time series runoff (CJ)

Table 5.4. List of calibration parameters for daily runoff simulation for the Dodang watershed

File	Parameter	Definition	Range	Default Value	Calibrated
.gw	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	0.0-1.0	0.048	0.95
.gw	ALPHA_BF_D	Alpha factor for groundwater recession curve of the deep aquifer (1/days)		0.01	0.95
.gw	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	0.0-5,000	1000	4500
.gw	GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02-0.2	0.02	0.02
.bsn	SURLAG	Surface runoff lag coefficient	1-12	4	1
.hru	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.0~1.0	0.95	0.95

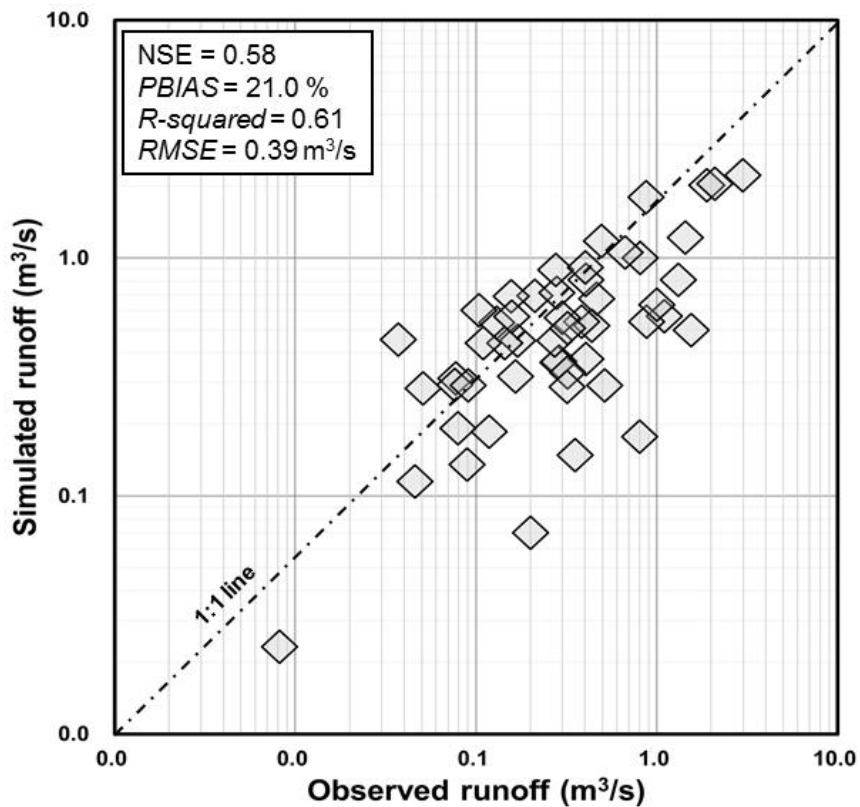


Fig. 5.5. Schematic of 1:1 line of observed and simulated runoff (DD)

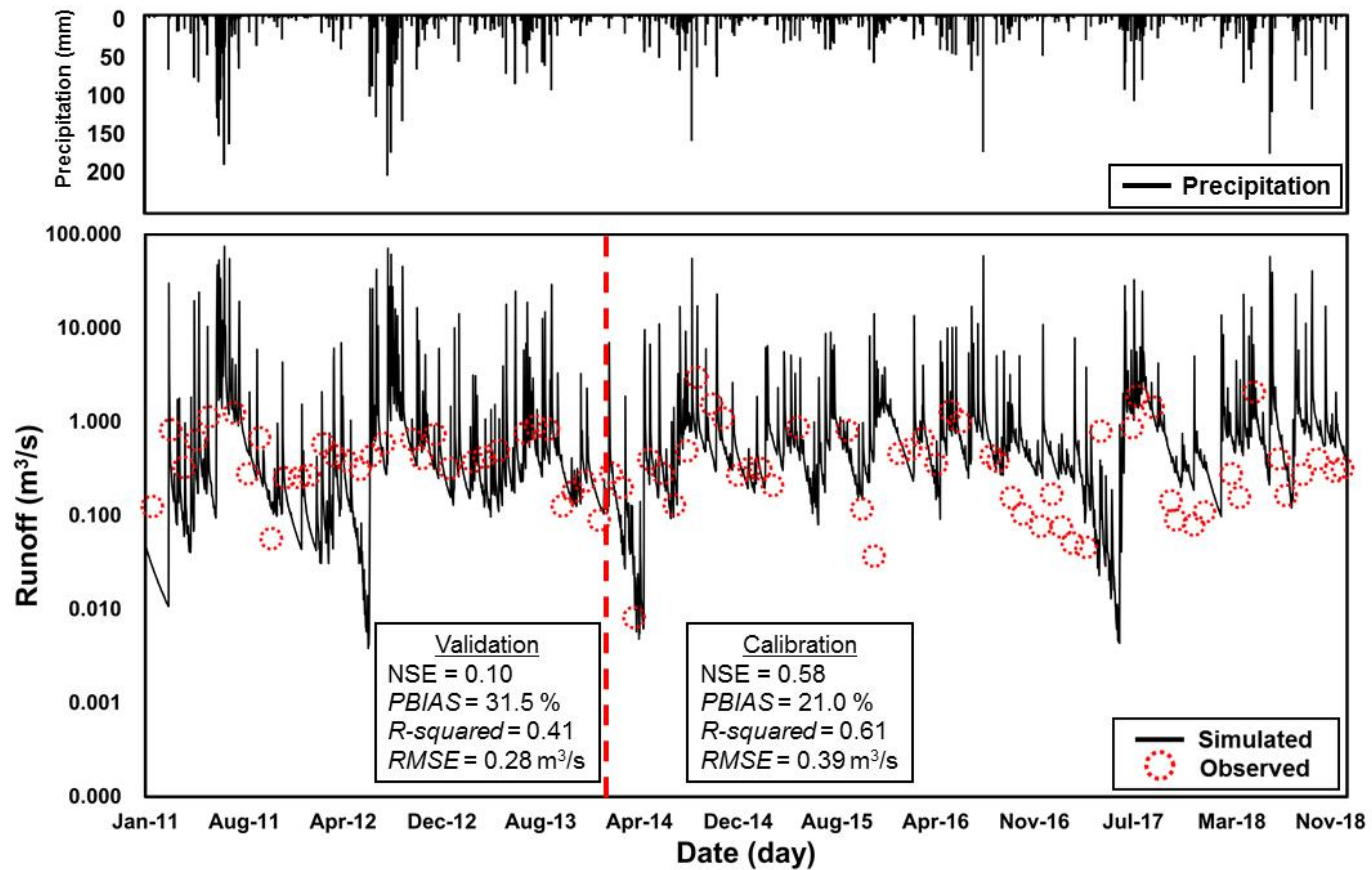


Fig. 5.6. Schematic of observed and simulated time series runoff (DD)

Table 5.5. List of calibration parameters for daily runoff simulation for the Waryong watershed

File	Parameter	Definition	Range	Default Value	Calibrated
.gw	ALPHA BF	Baseflow alpha factor	0.0-1.0	0.048	0.84
.gw	ALPHA_BF_D	Alpha factor for groundwater recession curve of the deep aquifer (1/days)		0.01	0.75
.gw	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	0.0-5,000	1000	4500
.gw	GW REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02-0.2	0.02	0.1
.bsn	SURLAG	Surface runoff lag coefficient	1-12	4	6
.hru	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.0~1.0	0.95	0.95

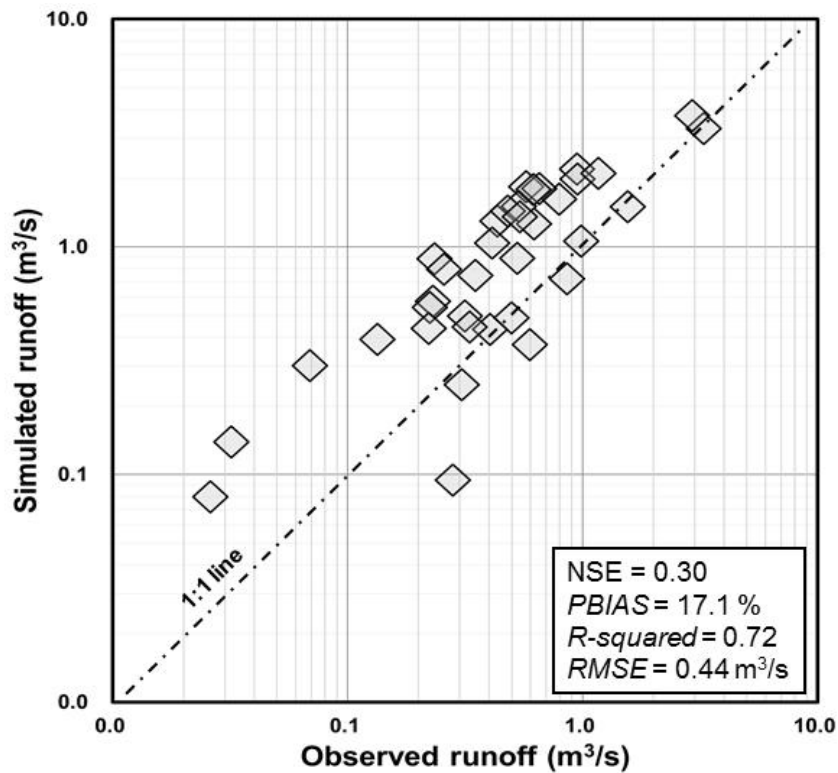


Fig. 5.7. Schematic of 1:1 line of observed and simulated runoff (WA)

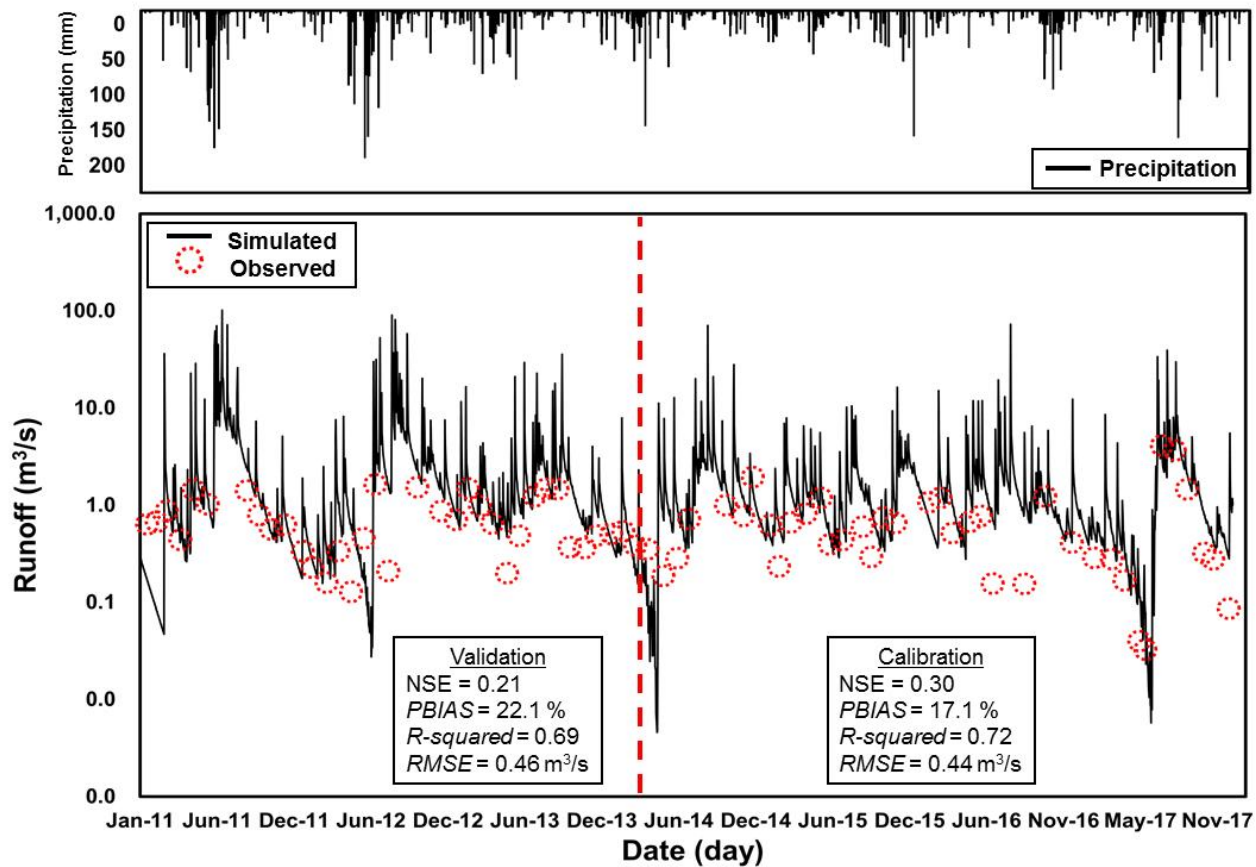


Fig. 5.8. Schematic of observed and simulated time series runoff (WA)

Table 5.6. List of calibration parameters for daily runoff simulation for the Dundang watershed

File	Parameter	Definition	Range	Default Value	Calibrated
.gw	ALPAHA BF	Baseflow alpha factor	0.0-1.0	0.048	0.90
.gw	ALPAHA_BF_D	Alpha factor for groundwater recession curve of the deep aquifer (1/days)		0.01	0.80
.gw	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	0.0-5,000	1000	1000
.gw	GW REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02-0.2	0.02	0.1
.bsn	SURLAG	Surface runoff lag coefficient	1-12	4	12
.hru	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.0~1.0	0.95	0.95

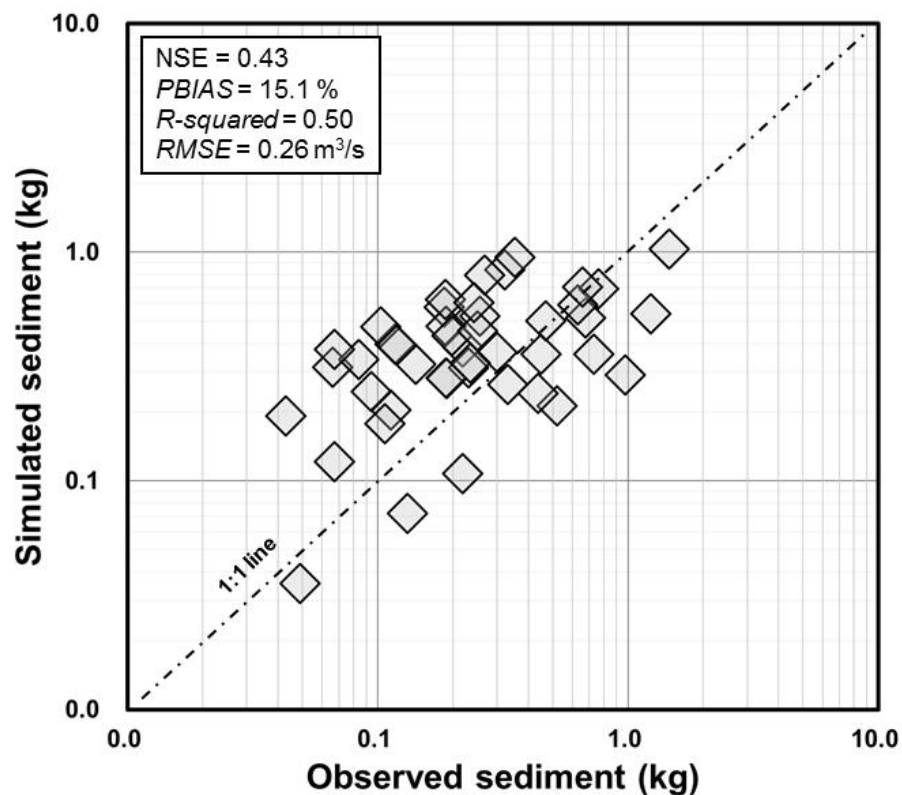


Fig. 5.9. Schematic of 1:1 line of observed and simulated runoff (Dun)

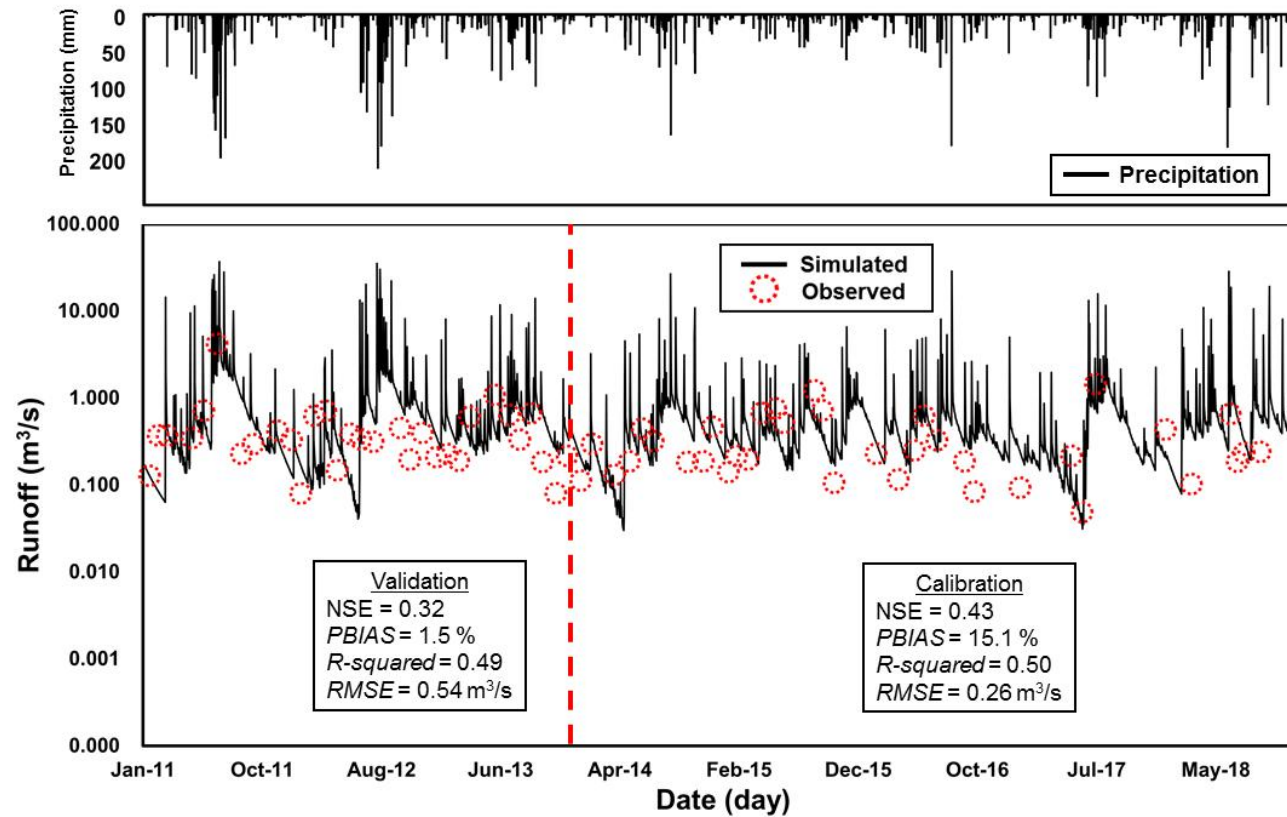


Fig. 5.10. Schematic of observed and simulated time series runoff (Dun)

5.1.2 SWAT 모형을 이용한 수질 모의 및 보·검정

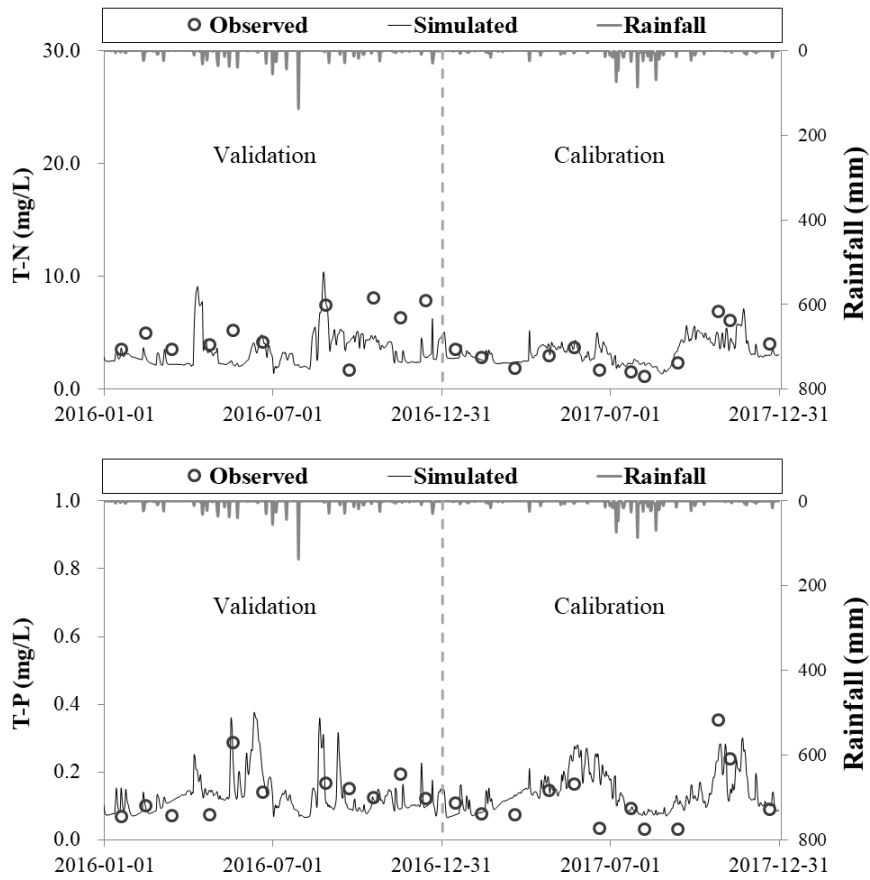
본 연구에서는 SWAT 모형의 수질 항목을 보정 및 검정하기 위하여 시행착오법을 이용하였고, 비교적 자료의 품질이 좋고, EFDC 모의 기간에 맞추어 2015-2017년 자료를 이용하였으며, 2015년 자료의 경우, 초기값이 영향을 고려하여 2016년 자료에 대하여 보정, 2017년 자료에 대해 검정을 수행하였다 (Fig. 5.11-5.14).

청지천 측정지점의 수질 관측값 평균은 T-N은 4.073 mg/L, T-P는 0.125 mg/L로 나타났으며, 유역모델의 모의 평균값은 T-N은 3.395 mg/L, T-P는 0.130 mg/L로 분석되었다. PBIAS는 T-P는 3.65로 모의결과가 관측값을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났으며, T-N은 16.63으로 다른 항목에 비해 모의결과가 관측값을 잘 반영하지 못하고 있는 것으로 나타났다.

도당천 지점의 수질 관측 평균값은 T-N은 2.292 mg/L, T-P는 0.047 mg/L로 나타났으며, 유역모델의 모의 평균값은 T-N은 2.541 mg/L, T-P는 0.050 mg/L로 분석되었다. PBIAS는 T-N은 10.87, T-P는 7.28로 모의결과가 관측값을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다.

와룡천 측정지점의 수질 관측 평균값은 T-N은 5.228 mg/L, T-P는 0.064 mg/L로 나타났으며, 유역모델의 모의 평균값은 T-N은 4.566 mg/L, T-P는 0.070 mg/L로 분석되었다. PBIAS는 T-N은 12.67, T-P는 8.35로 모의결과가 관측값을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다.

둔당천 측정지점의 수질 관측값 평균은 T-N은 2.468 mg/L, T-P는 0.081 mg/L로 나타났으며, 유역모델의 모의 평균값은 T-N은 2.762 mg/L, T-P는 0.095 mg/L로 분석되었다. PBIAS는 T-N이 11.90으로 모의결과가 관측값을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났으며, T-P는 17.45로 다른 항목에 비해 모의결과가 관측값을 잘 반영하지 못하고 있는 것으로 나타났다.



Item	T-N	T-P
RMSE (mg/L)	0.14	0.01
PBIAS	16.63	3.65

Fig. 5.11. Schematic of observed and simulated time series runoff (CJ)

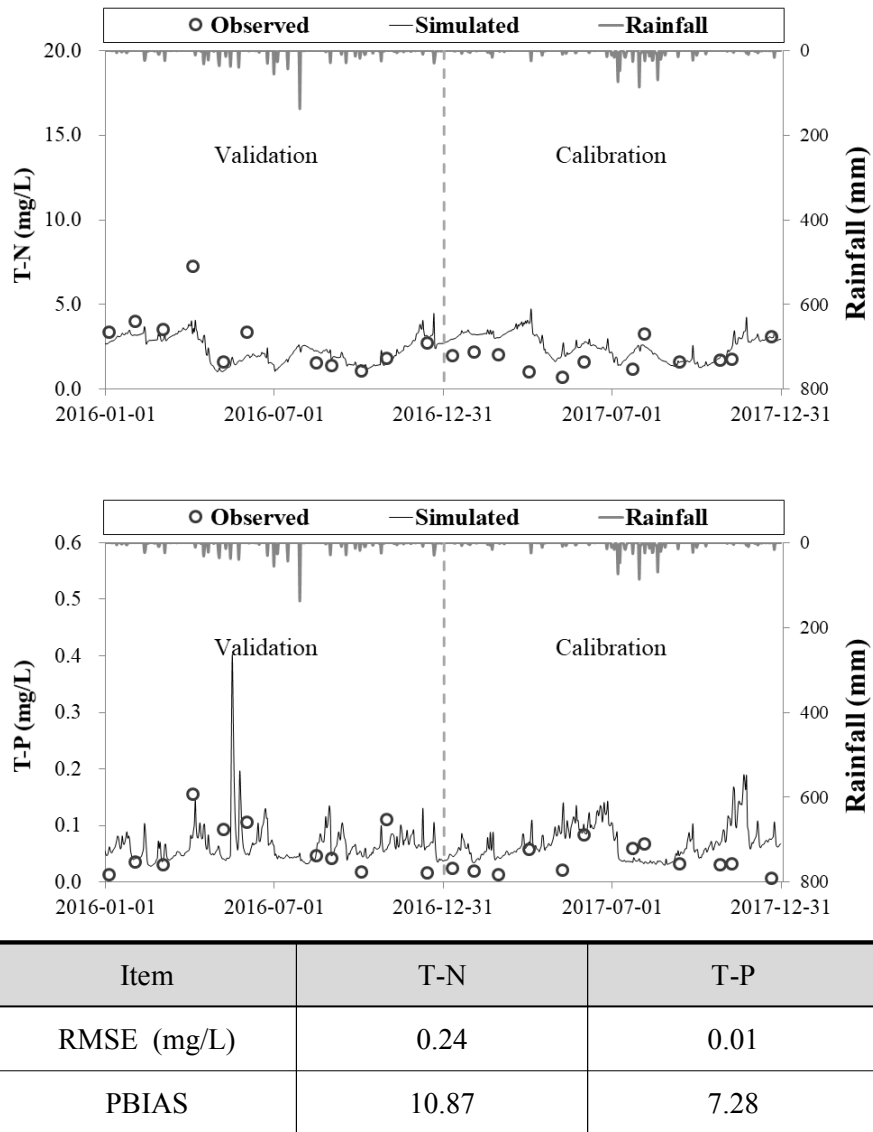
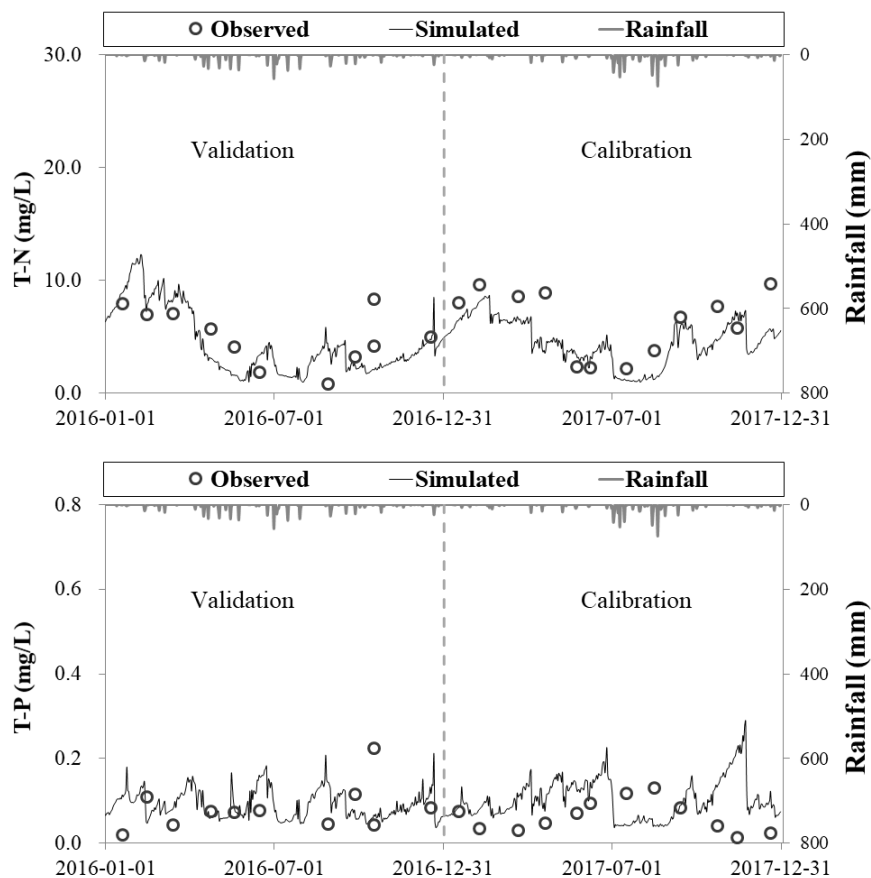


Fig. 5.12. Schematic of observed and simulated time series runoff (DD)



Item	T-N	T-P
RMSE (mg/L)	0.36	0.01
PBIAS	12.67	8.35

Fig. 5.13. Schematic of observed and simulated time series runoff (WA)

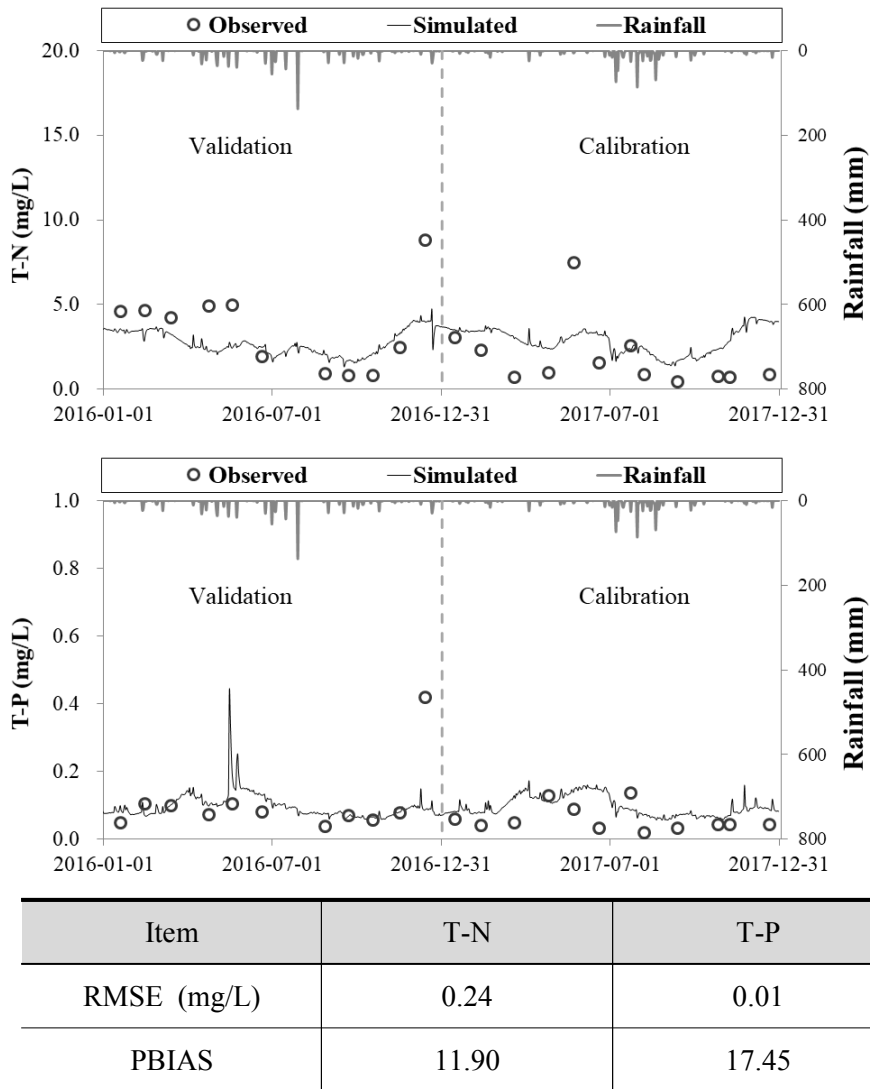


Fig. 5.14. Schematic of observed and simulated time series runoff (Dun)

5.1.3 수질모델링을 통한 유역 기여율 평가

본 연구에서 간월호 호내 T-P 변화 시나리오의 검토에 앞서 유역 모델링을 바탕으로 T-P의 하천별 기여율을 분석하였다. 간월호로 유입되는 총 부하량은 157.8 kg/day로 나타났으며, 간월호 유입하천 중 와룡천, 청지천, 기타 하천 등이 기여도가 높은 것으로 나타났다 (Fig. 5.15).

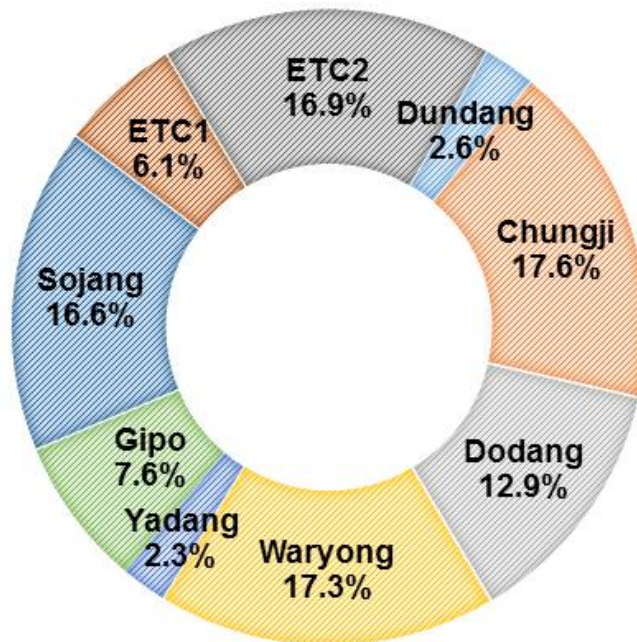


Fig. 5.15. Discharged T-P pollution contribution of each subbasin to Ganwol watershed

5.2 EFDC 모형을 이용한 담수호 수위·수질 모의

5.2.1 EFDC 모형을 이용한 수위 모의 및 보·검정

본 연구에서는 EFDC 모형을 이용한 수위 모의를 위하여 EFDC 모형의 격자를 구성하였으며, 한국농어촌공사로부터 제공 받은 최신 측량 자료를 이용하여 격자를 추출하였다 (Fig. 5.16). 1,879개의 수평방향격자와 5개의 수직방향격자로 총 9,395개의 격자로 구축하였다 (Table 5.7).

Table 5.7. Grid cells in EFDC model

Cell size (dx)		Grid cells	
23.7 - 209.7 (dx)	21.1 - 334.9 (dy)	1,879 (horizontal)	9,359 (5 layers, vertical)

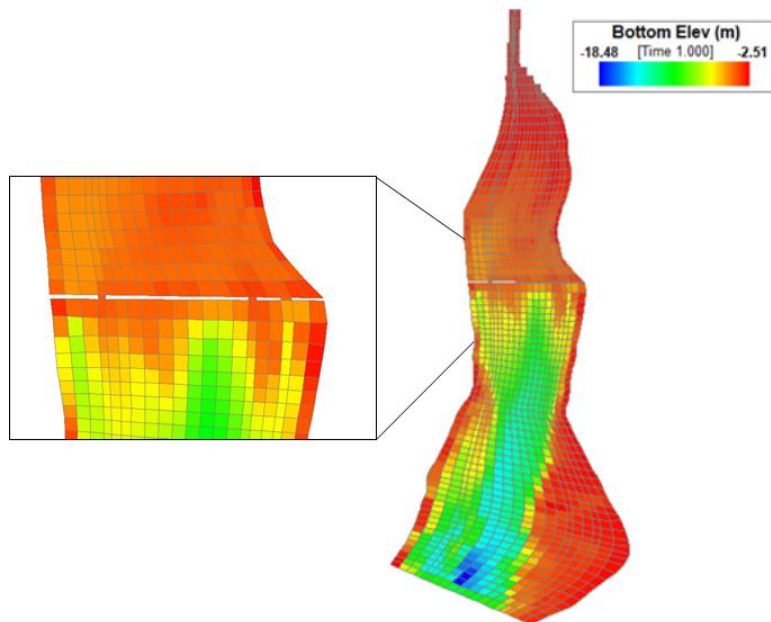


Fig. 5.16. Bottom elevation of Ganwol estuarine reservoir in EFDC model

간월호 호소 모델에 대하여 유역 유입량은 SWAT 모형의 결과를 이용하였으며, 배수갑문 조작일지와 양·배수장 자료를 이용하여 2015년부터 2017년의 수위 모의를 수행하였다 (Fig. 5.18). 또한 호내 상류와 중·하류간을 구분 짓는 다리가 존재하기 때문에 이를 반영하여 구축 및 보정하였다. 수위 보정 결과 (Fig. 5.17), R^2 값이 0.9002로 재현성이 높은 것으로 나타났으며, 유역에서 호내로 들어오는 양과 갑문과 양수장에서 빠져나가는 양이 월별로 매우 유사하게 나타났다 (Table 5.8).

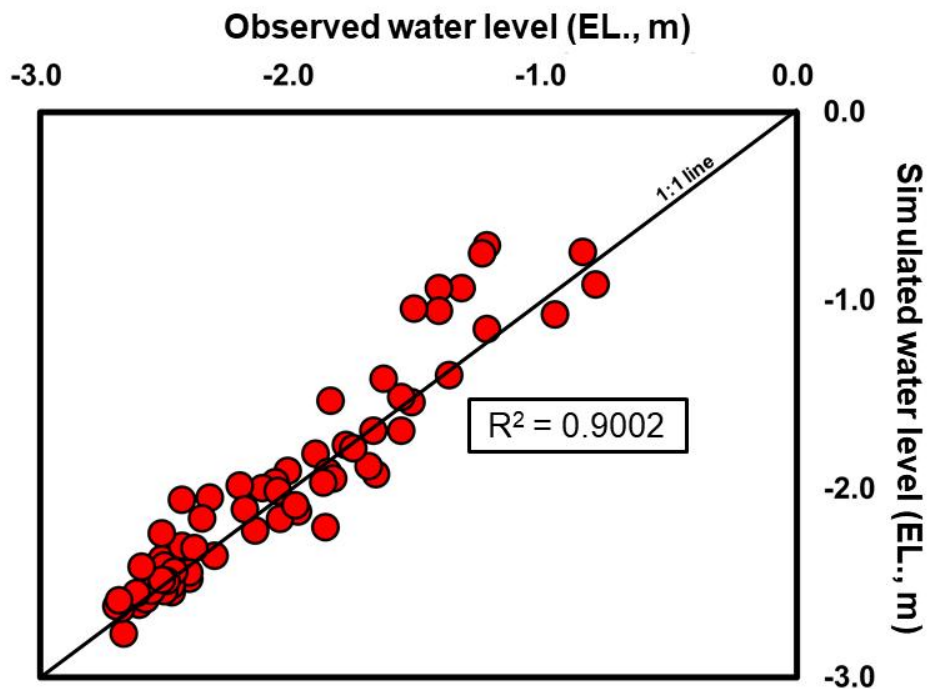


Fig. 5.17. Observed and simulated water level elevation of Ganwol estuarine reservoir

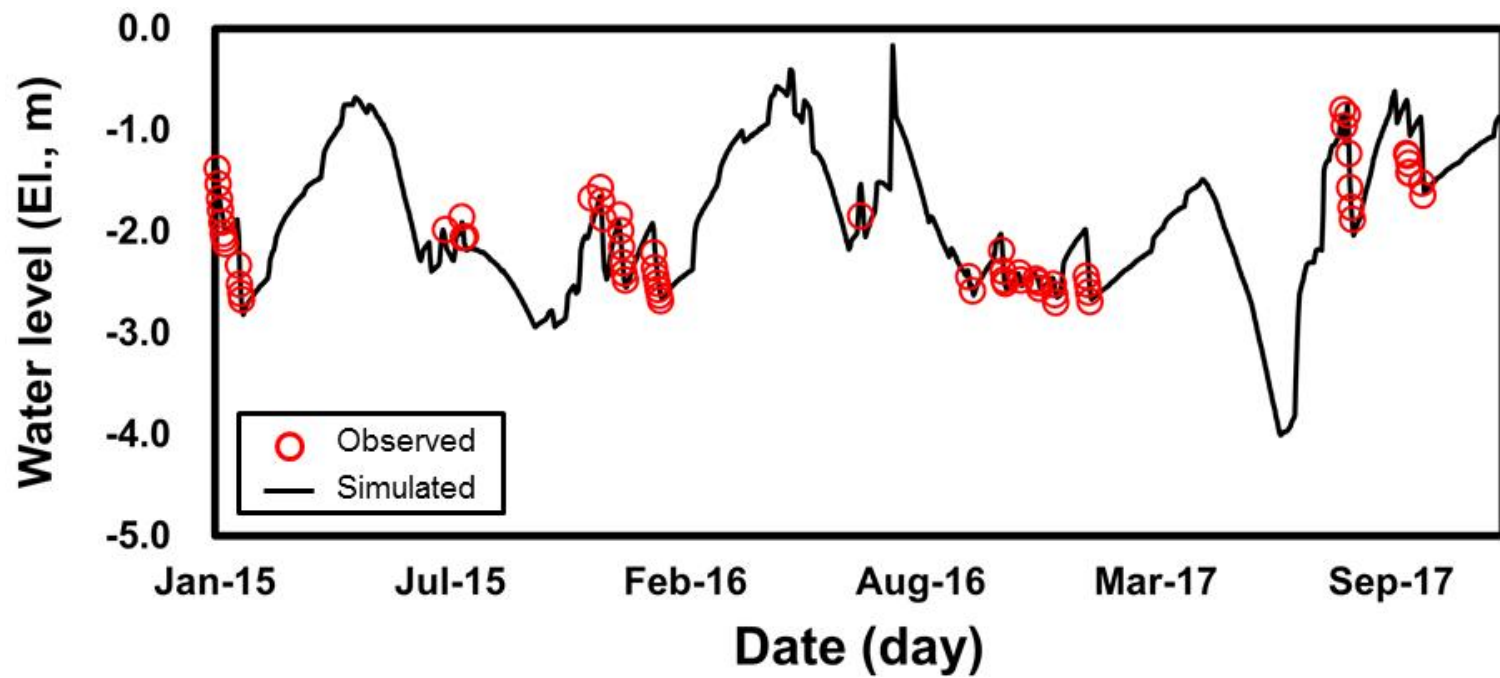


Fig. 5.18. Water level elevation changes of Ganwol estuarine reservoir

Table 5.8. Water balance analysis results

Date (year and month)		Watershed inflow (A) (million m³)	Outflow by sluice gate (B) (million m³)	Irrigation water pumping (C) (million m³)	△(A-B-C) (million m³)
2015	1	1,516	4,730	-	-3,214
	2	1,892	-	-	1,892
	3	1,024	-	-	1,024
	4	2,400	-	453	1,947
	5	1,529	-	2,648	-1,119
	6	971	-	3,408	-2,437
	7	3,314	1,718	1,570	26
	8	2,481	533	2,570	-622
	9	932	-	2,357	-1,425
	10	1,426	461	-	965
	11	3,904	3,646	-	258
	12	3,211	2,325	-	886
Total		28,436.74	14,977.88	15,203.62	-1,745
2016	1	1,256	2,169	-	-913
	2	2,132	-	-	2,132
	3	1,601	308	-	1,293
	4	1,781	-	1,111	670
	5	4,278	2,381	3,612	-1,715
	6	1,592	1,568	2,613	-2,589
	7	8,332	1,916	2,235	4,181
	8	2,058	-	4,165	-2,107
	9	1,551	958	2,197	-1,604
	10	2,040	1,535	-	505
	11	959	862	-	97
	12	1,701	1,030	-	671
Total		29,280	12,726	15,932	622
2017	1	885	1,837	-	-952
	2	654	-	-	654
	3	1,148	-	-	1,148
	4	827	-	908	-81
	5	389	-	3,098	-2,709
	6	272	-	2,613	-2,341
	7	7,618	-	1,999	5,619
	8	7,189	5,393	2,201	-405
	9	3,084	969	-	2,115
	10	1,690	2,969	-	-1,279
	11	721	-	-	721
	12	1,024	-	-	1,024
Total		25,501	11,168	10,819	3,514

5.2.2 EFDC 모형을 이용한 수질 모의 및 보·검정

간월호 호소 모델에 대하여 환경부 수질측정망 자료를 이용하여 2016년-2017년 보·검정을 실시하였다. 2016년-2017년까지 온도자료에 대해 먼저 보정을 수행하고, 이후 DO, T-P, PO₄-P 순으로 EFDC 모델의 다양한 매개변수를 보정하였다. 단, EFDC 모형의 경우 호내 수질의 변화는 외부에서 유입하는 오염물질 뿐만 아니라 내부 기작에 따른 계절별 변화에 따른 수질 변화, 조류 변화, 기상 변화 등에도 영향을 받으므로 분석 대상 물질은 아니나 T-N, Chl-a 등의 자료에 대해서도 모의 유사성을 가질 수 있도록 매개변수를 보정 및 검정하였다. 또한 간월호의 경우, 앞서 기술한 바와 같이 호내 중간에 연결도로를 포함하고 있고, 제방으로 이루어져 좁은 수로 3개로 상류와 하류가 이어지기 때문에 호내 지점별 수질 특성이 상이하다. 따라서 간월호를 3개 구역으로 나누었으며, 수질 (조류 및 용출) 모의 매개변수를 구역별로 구성하였다.

Table 5.9는 매개변수 보정에 사용된 매개변수를 나열한 것으로 PM, BM, WS, PO4D (용출), NH4 (용출), NO3 (용출) 매개변수의 경우에는 구역별로 값을 다르게 하여 보정하였다.

Table 5.9. List of calibrated parameters in EFDC model

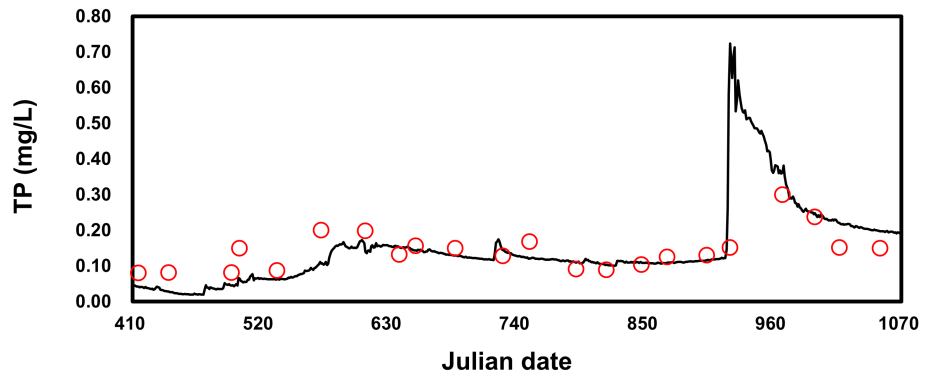
Parameters		Unit	Definition	Final value
CChlx		mg C/ μ g Chl	carbon-to-chlorophyll ratio in algal group x	0.03
ANCg		-	algal nitrogen to carbon ratio	0.1
K_{RP}		day ⁻¹	minimum hydrolysis rate of refractory particulate organic phosphorus	0.1
K_{LP}		day ⁻¹	minimum hydrolysis rate of labile particulate organic phosphorus	0.04
K_{DP}		day ⁻¹	minimum mineralization rate of dissolved organic phosphorus	0.25
K_{DC}		day ⁻¹	minimum respiration rate of dissolved organic carbon	0.01
rNitm		gN/m ³ /d	maximum nitrification rate at temperature TNit	0.07
PMx	GW1	day ⁻¹	maximum growth rate under optimal conditions for algal group x	3.5
	GW2			3.9
	GW3			2.5
BMx	GW1	day ⁻¹	basal metabolism rate of algal group x	0.05
	GW2			0.05
	GW3			0.05
WSx	GW1	m/d	settling velocity of algal group x	0.3
	GW2			0.3
	GW3			0.5
PO ₄ D (Benflx)	GW1	g/m ² /d	PO ₄ -P benthic flux	0.0001
	GW2			0.0010
	GW3			0.0020
NH ₄ (Benflx)	GW1	g/m ² /d	NH ₄ -N benthic flux	0.009
	GW2			0.009
	GW3			0.100
NO ₃ (Benflx)	GW1	g/m ² /d	NO ₃ benthic flux	0.0001
	GW2			0.0001
	GW3			0.001

본 연구에서는 간월호 2 (중류) 지점과 간월 3 (상류) 지점에 대하여 수질 보·검정을 수행하였으며, 목적함수는 (Observed Ave.)/(Simulated Ave.)의 값인 O/S를 이용하였다. O/S의 경우에는 1에 가까울수록 모형의 정확도가 높다고 할 수 있다. EFDC 모형의 경우 초기값에 영향을 많이 받으므로 2016-2017년 자료에 대해 보정을 위한 자료로 활용하였고, 2015년의 경우 검정을 위한 자료로 활용하였다. 2015년의 경우 초기에는 모형의 초기값에 따른 영향을 고려하여, 2015년의 관측값 중 80일이 경과한 시점의 관측값을 검정에 활용하였다.

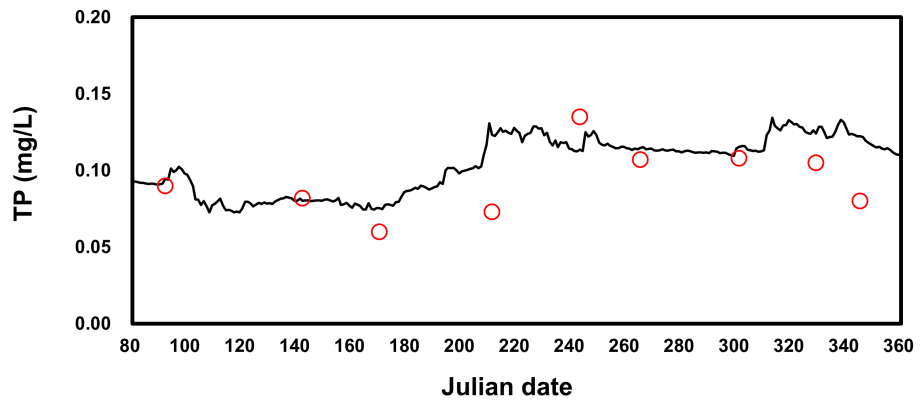
우선, 보정을 위하여, 온도, DO, 수질 항목 순으로 보정을 수행하였으며, EFDC 모형에서 수질 모의 시 조류 (algae)의 거동에 영향을 많이 받기 때문에 chl-a, T-N 등의 기타 수질 자료도 관측값을 참조하여, T-P 보정에 활용하였다. 보·검정 결과 (Table 5.10), 보정 값이 두 지점 모두 0.95 이상의 값으로 나타나, 보정이 잘 수행되었다고 볼 수 있다. 보정 및 검정 결과는 Fig. 5.19과 Fig. 5.20에 나타내었다.

Table 5.10. Calibration result

Location	Content	TEMP	DO	T-P (cal.) (2016-2017)	T-P (val.) (2015)
GW2	Observed Ave.	16.60	11.99	0.143	0.105
	Simulated Ave.	17.32	10.62	0.148	0.101
	O/S	0.959	1.128	0.964	0.961
GW3	Observed Ave.	16.64	10.34	0.242	0.201
	Simulated Ave.	17.17	10.41	0.232	0.186
	O/S	0.969	0.993	0.957	0.927

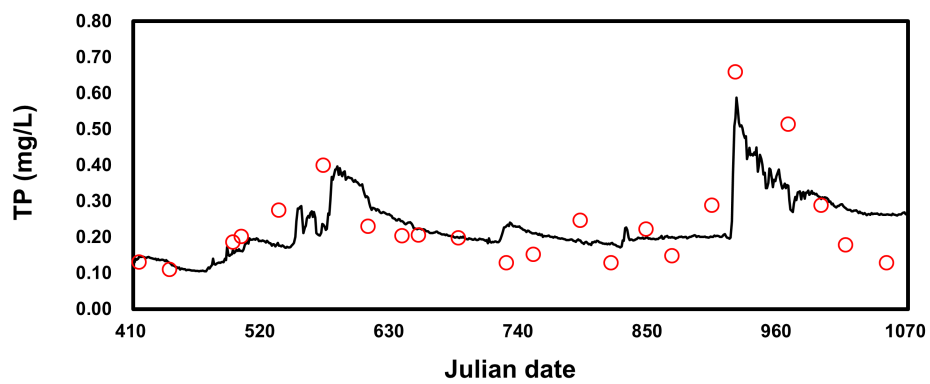


<Calibration 2016-2017>

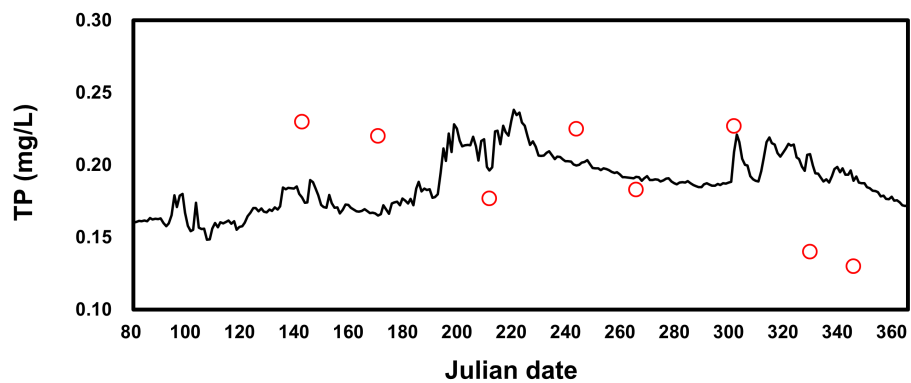


<Validation 2015>

Fig. 5.19. GW2 point calibration results



<Calibration 2016-2017>



<Validation 2015>

Fig. 5.20. GW3 point calibration results

Fig. 5.21와 Fig. 5.22는 시기별 T-N과 T-P의 변화를 나타낸 것이다.

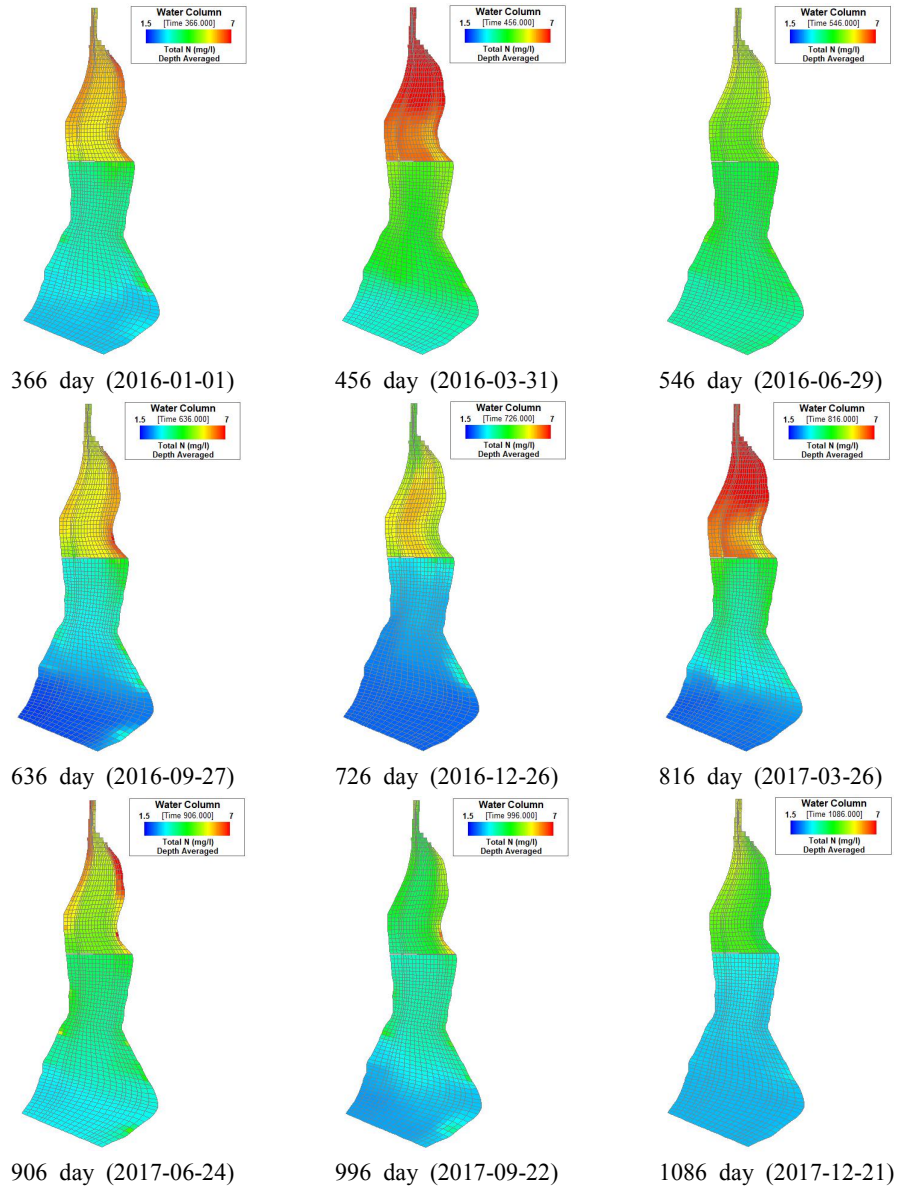


Fig. 5.21. T-N concentration changes with time series

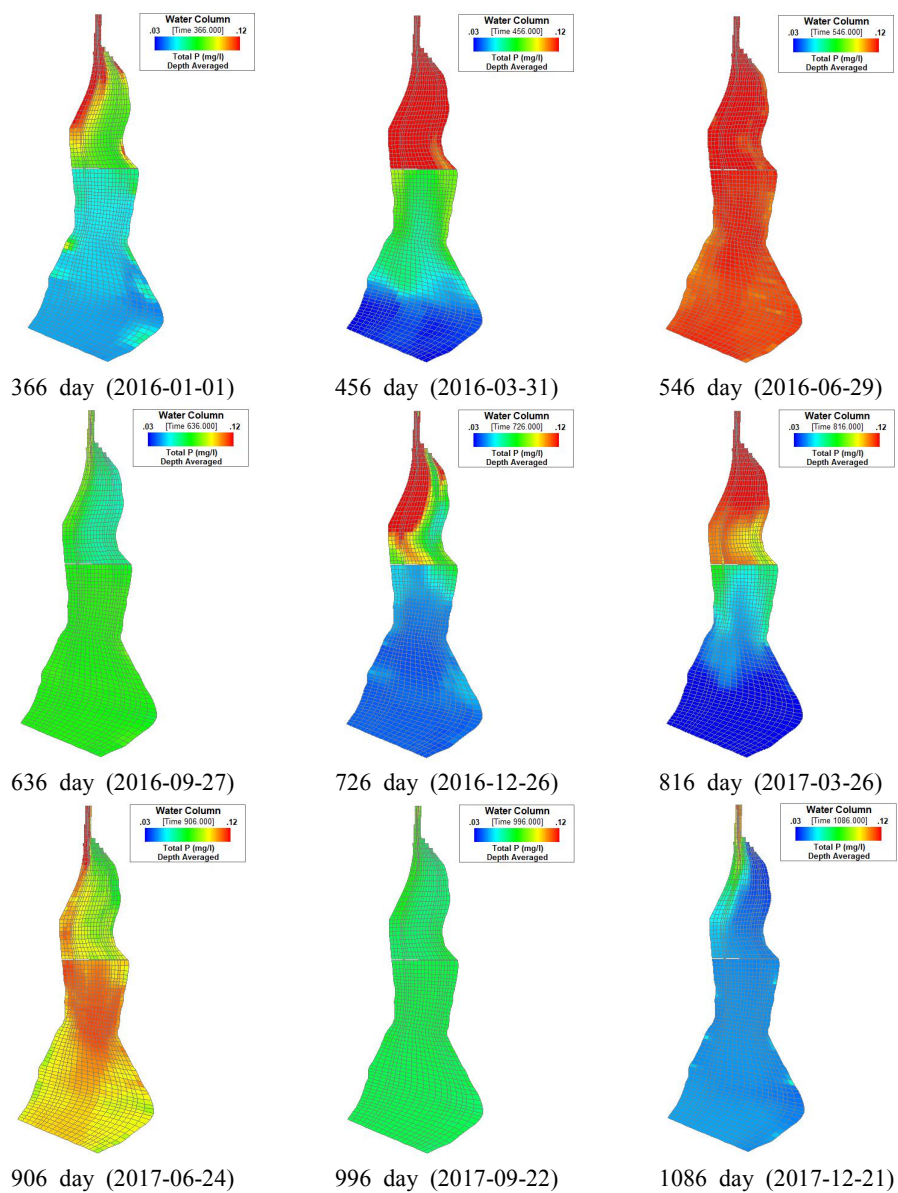


Fig. 5.22. T-P concentration changes with time series

제 6 장 동적회복탄력성 기반 담수호 수질 관리 방안 평가

6.1 수질 관리 방안 시나리오 구성

우선, 동적 회복탄력성 분석에 앞서 호내 지점별로 시나리오별 수질 모의 결과를 비교하였다. 본 연구에서는 총 14개의 시나리오를 검토하였으며, 시나리오를 요약하면 아래 Table 6.1과 같다.

Fig. 6.1과 같이 현재 준설을 수행하고 있는 구역 (zone) 3에 대해 각각 준설을 시행하는 시나리오를 구성하였으며 (S1 - S4), 구역 3과 더불어 준설이 예정되어있는 구역 2에 대해서도 준설 시나리오를 작성하였다 (S5-S8). 또한 서산공공하수처리시설에 대하여 총인처리 시설의 증설 (T-P reduction 50%)과 더불어 고도화 처리 시설 (T-P reduction 90%) 적용 시나리오 (S9 - S10)도 구성하여 적용하였다. 마지막으로 준설 시나리오와 총인처리 시설을 적용 시나리오를 개별 시나리오로 구성하는 것이 아니라 동시에 고려하는 시나리오 (S11 - S14)를 구성하여 모의를 수행하였다.

Table 6.1. Description of the applied scenario

Scenario	Content
No scenario	Scenario #0 (Now)
Dredging operation in zone 3	Scenario #1 (P and N leaching rate 20% reduction)
	Scenario #2 (P and N leaching rate 40% reduction)
	Scenario #3 (P and N leaching rate 60% reduction)
	Scenario #4 (P and N leaching rate 80% reduction)
Dredging operation in zone 2&3	Scenario #5 (based on Scenario #3) (P and N leaching rate 40% reduction in Zone 2)
	Scenario #6 (based on Scenario #3) (P and N leaching rate 60% reduction in Zone 2)
	Scenario #7 (based on Scenario #4) (P and N leaching rate 40% reduction in Zone 2)
	Scenario #8 (based on Scenario #4) (P and N leaching rate 60% reduction in Zone 2)
T-P discharge reduction from Publically owned treatment utilities (Seosan)	Scenario #9 (50% T-P discharge reduction)
	Scenario #10 (90% T-P discharge reduction)
Comprehensive scenario	Scenario #11 (Scenario #7 & Scenario #9)
	Scenario #12 (Scenario #7 & Scenario #10)
	Scenario #13 (Scenario #8 & Scenario #9)
	Scenario #14 (Scenario #8 & Scenario #10)

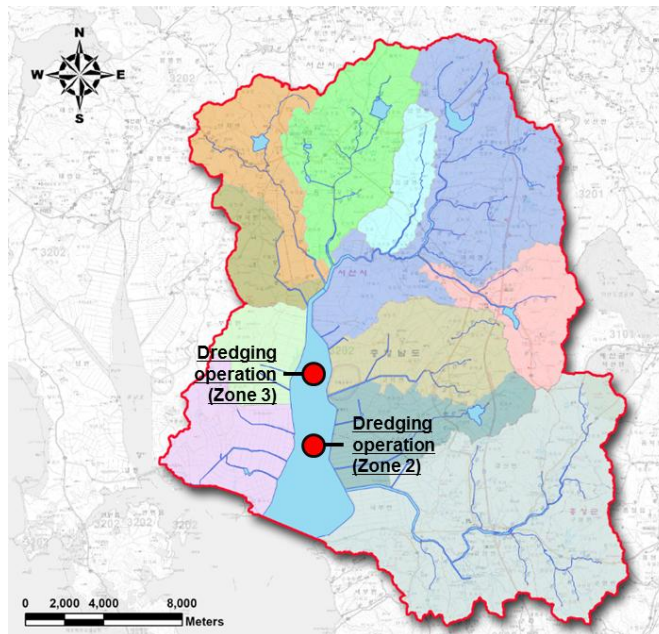


Fig. 6.1. Dredging operation scenario

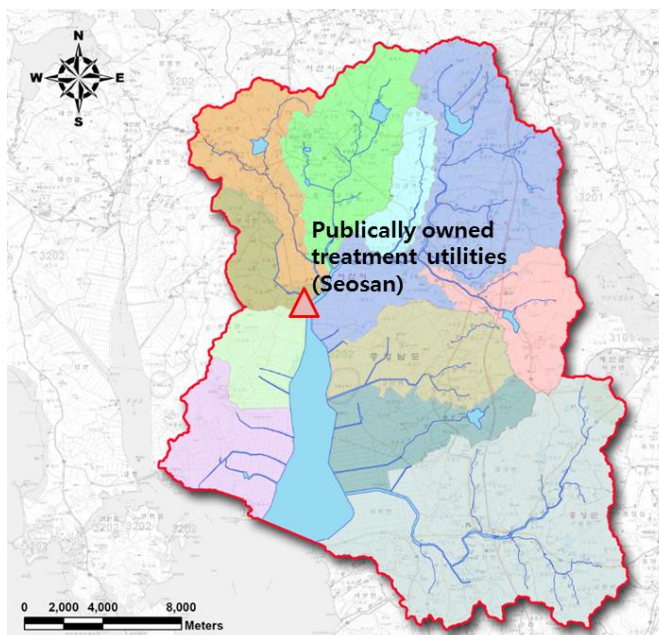


Fig. 6.2. T-P discharge reduction scenario

6.2 시나리오별 담수호 수질 모의 결과 분석

6.2.1 담수호 구간별 수질 모의 결과

가. 간월호 상류 모의 결과

Fig. 6.3은 3번 구역 (Zone 3)에 대하여 2015년의 시나리오별 간월호 T-P 수질 변화를 모의한 결과를 나타낸 것이다. 모의 결과, 연평균 수질은 아무 대책을 적용하지 않은 경우, T-P는 0.183 mg/L로 나타났으며, 시나리오를 적용하였을 경우 각각, S1 0.182 mg/L, S2 0.179 mg/L, S3 0.175 mg/L, S4 0.172 mg/L로 나타났다. 3번 구역에 대해서만 준설을 실시할 경우에는 2015년의 경우, 목표 수질 기준인 1 mg/L를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 특징으로는 S1 시나리오의 경우, 전반적으로 수질은 대책을 적용하지 않은 경우에 비해 낮게 나타났으나, 일부 시기에 오히려 대책을 적용하지 않은 때보다도 높은 수질을 보이기도 한다.

전체적으로 수질 변화 경향을 살펴보면, 수질이 악화되고 난 후 수질이 낮아지는 과정에서 대책을 적용하지 않은 경우 경사가 완만하게 나타났는데, 이는 호내 부하량이 높은 상태에서는 담수호의 수질 회복 역량이 낮은 것으로 볼 수 있다. 따라서 비록 준설만으로 담수호의 수질 목표 달성을 이루기는 어려운 것으로 나타났으나 담수호 시스템의 회복탄력성을 높일 수 있는 방안이라 할 수 있다.

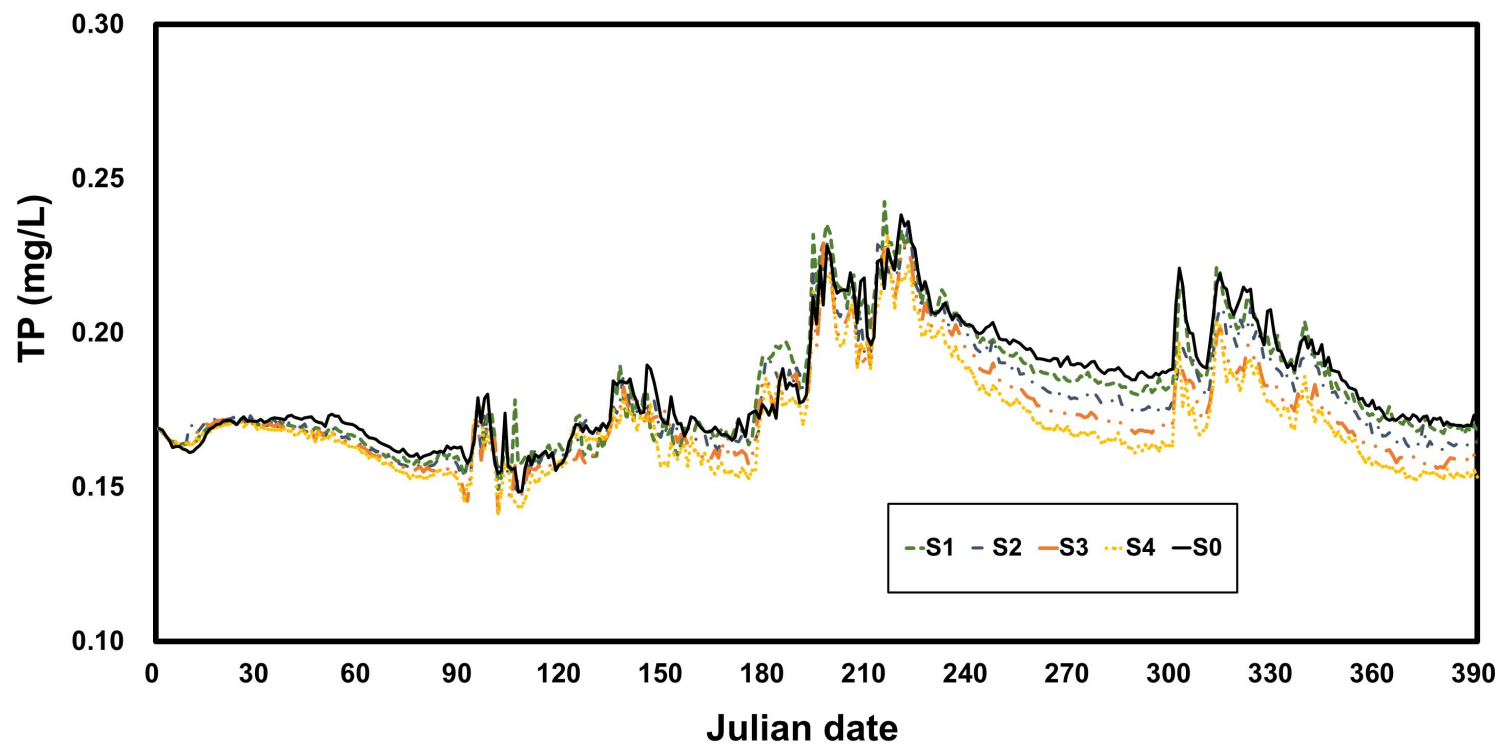


Fig. 6.3. Simulated results of T-P concentration (Zone 3, S0, S1-S4)

Fig. 6.4는 시나리오 S3를 기반으로 2구역에서도 준설을 진행한 시나리오 S5, S6을 아무 대책을 적용하지 않은 경우와 함께 간월호 T-P 수질 변화를 모의한 결과를 나타낸 것이다. 모의 결과, 호내 가운데 제방의 영향으로 인해 상하류 수질의 순환이 원활하게 이루어지지 않고 있음을 시나리오별 비교 결과를 통해 알 수 있으며, 2구역에 준설을 진행하더라도 상류에 수질 변화에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 연평균 수질은 아무 대책을 적용하지 않은 경우 (T-P 모의결과 0.183 mg/L)에 비해서는 다소 낮게 나타났으나 시나리오 S3의 T-P 모의결과 (0.175 mg/L)와 거의 유사하게 S5, S6 시나리오도 각각 T-P 수질 농도가 0.175 mg/L의 결과를 보였다.

Fig. 6.5는 시나리오 S4를 기반으로 2 구역에서도 준설을 시행한 시나리오 S7, S8을 아무 대책을 적용하지 않은 경우와 함께 간월호 T-P 수질 변화를 모의한 결과를 나타낸 것이다. 모의 결과, 앞선 S5, S6와는 달리 상류에서 준설이 많이 진행된 상태에서는 하류 준설에 따른 영향을 일부 받는 것으로 나타났으며, 실제 연평균 수질 농도도 S4 시나리오의 T-P 모의결과 0.172 mg/L에 비해, 시나리오 S7, S8이 T-P 모의결과 각각 0.171 mg/L, 0.171 mg/L로 소폭 낮게 나타났다. 평균 농도뿐만 아니라 수질 변화 경향을 살펴보면, 수질 변화 농도가 2015년 초기와는 달리 시간이 지날수록 수질이 악화되는 시점에 수질 농도가 낮게 나타났으며 이는 회복탄력성이 이전 시나리오에 비해 소폭 높아졌다고 볼 수 있다.

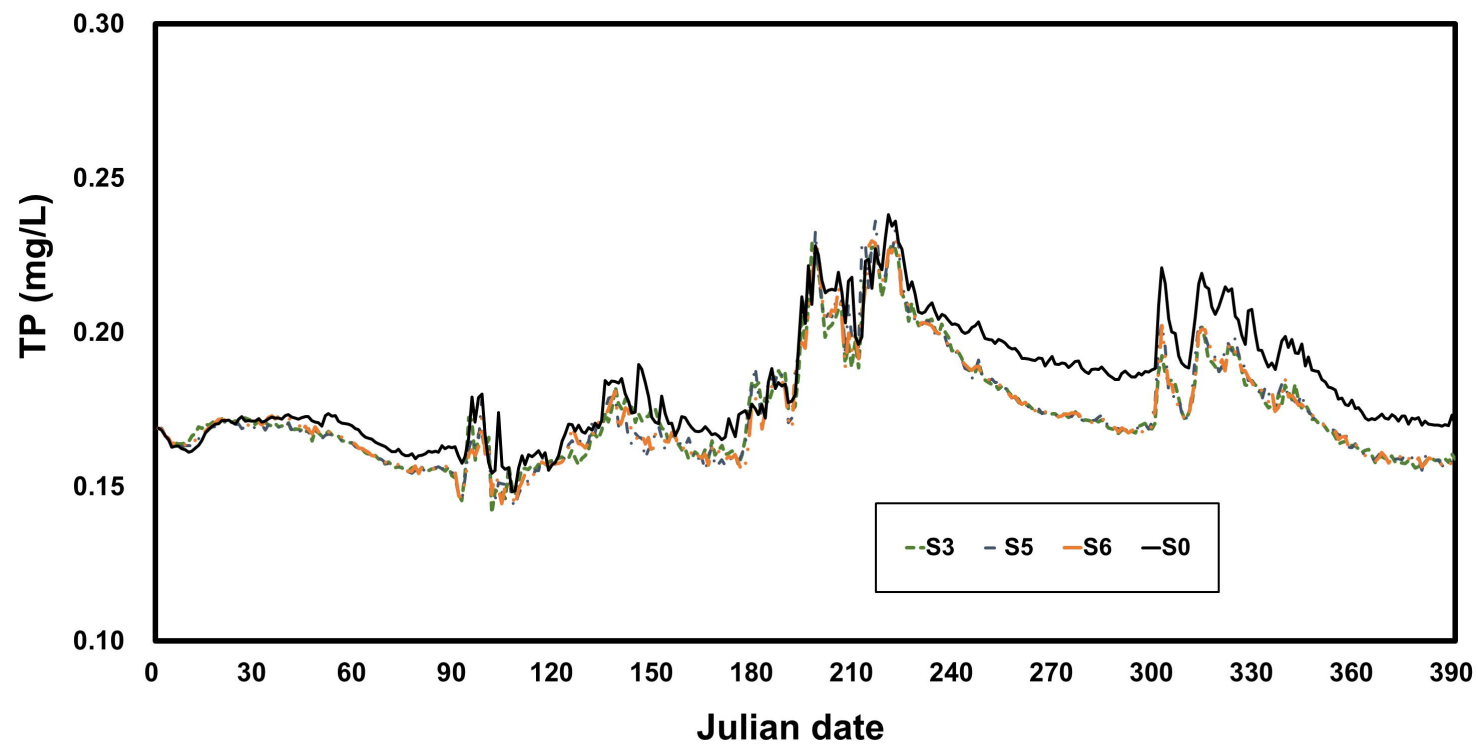


Fig. 6.4. Simulated results of T-P concentration (Zone 3, S0, S3, S5-S6)

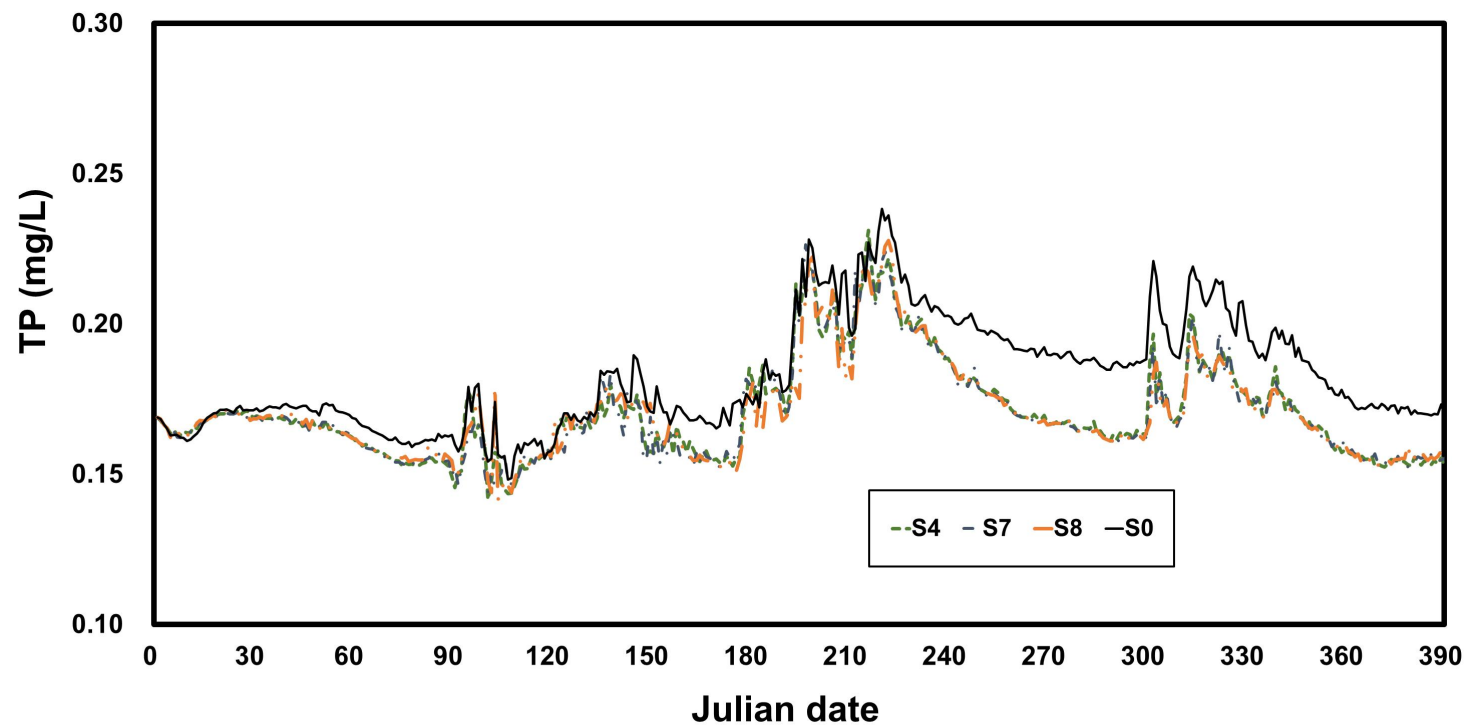


Fig. 6.5. Simulated results of T-P concentration (Zone 3, S0, S4, S7-S8)

Fig. 6.6은 간월호 상류 유입부에 위치한 하수처리장에 총인처리시설 증설 (시나리오 S9)과 총인처리 고도화 시설 (시나리오 S10)을 설치한 경우에 대해 수질 변화를 모의한 결과이다. 본 시나리오는 전체 기간에 대해 동일한 하수처리장 방류 부하 저감량을 적용한 결과이다. 연평균 T-P 수질을 비교한 결과, 시나리오 S9와 시나리오 S10의 수질 농도가 각각 0.169 mg/L, 0.156 mg/L로 나타나, 준설 시나리오에 비해 수질 개선에 큰 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 특히, 준설을 시행한 시나리오와는 달리 아무런 대책을 적용하지 않은 시나리오에 비해서 전반적으로 수질이 악화하는 경우에 최대 농도도 낮을 뿐만 아니라 수질이 악화되는 상황에서 수질이 회복하는 시간도 빨라 시나리오 S9와 시나리오 S10의 경우 회복탄력성이 준설 시나리오에 비해 상당히 높은 것으로 보인다. 이는 담수호 상류 유입부에 위치한 서산하수처리장의 경우, 하수처리장에서 배출되는 오염원의 유달율이 상당히 높고, 매일 배출하는 부하량도 상당히 높기 때문이다.

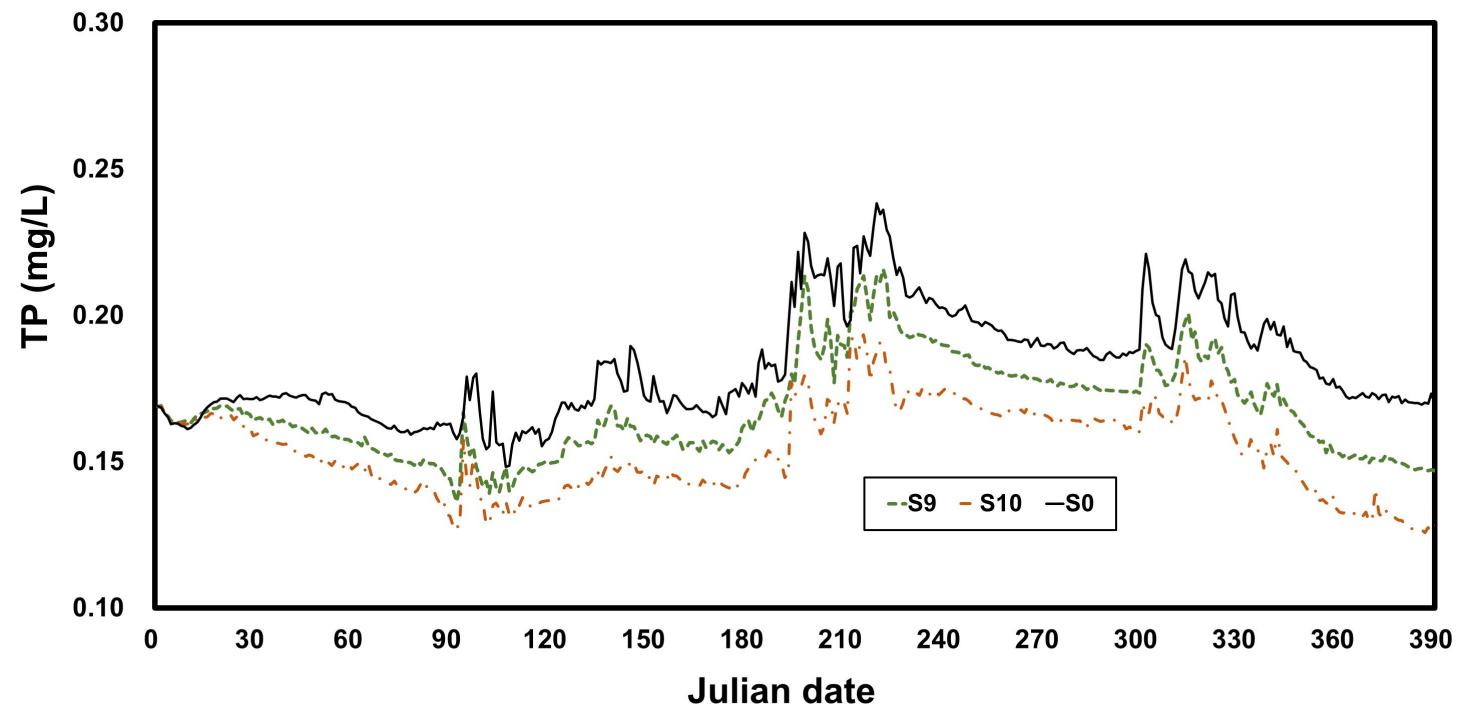


Fig. 6.6. Simulated results of T-P concentration (Zone 3, S0, S9-S10)

Fig. 6.7은 복합적인 시나리오를 구성한 경우로, 시나리오 S11과 S12는 시나리오 S7을 바탕으로 하수처리장 총인처리시설 개선 적용 시나리오 S9, S10을 적용한 것이며, 시나리오 S13과 시나리오 S14는 시나리오 S8을 바탕으로 하수처리장 총인처리시설 개선 적용 시나리오 S9, S10을 적용한 것이다. 즉, 4개 시나리오는 준설 시나리오와 하수처리장 증설 시나리오를 함께 고려하였다.

모의결과, 시나리오 S11-S14까지 연평균 T-P 수질 농도는 각각 0.156 mg/L, 0.142 mg/L, 0.156 mg/L, 0.142 mg/L로 나타났다. 시나리오 S11과 시나리오 S13 그리고 시나리오 S12와 시나리오 S14의 결과가 유사하게 나타났는데, 이는 준설의 진행이 어느 수준 이상에서는 하수처리장 방류 부하량의 영향이 더 크게 미치는 것으로 간주할 수 있다. 특히, S11의 경우 준설을 하지 않고 하수처리장의 총인처리 시설 증설만 진행한 결과인 S10과 거의 유사한 결과를 보여, 하수처리장의 총인 처리 시설이 담수호 상류 시스템의 수질 회복탄력성에 큰 영향을 미치고 있음을 확인 할 수 있었다.

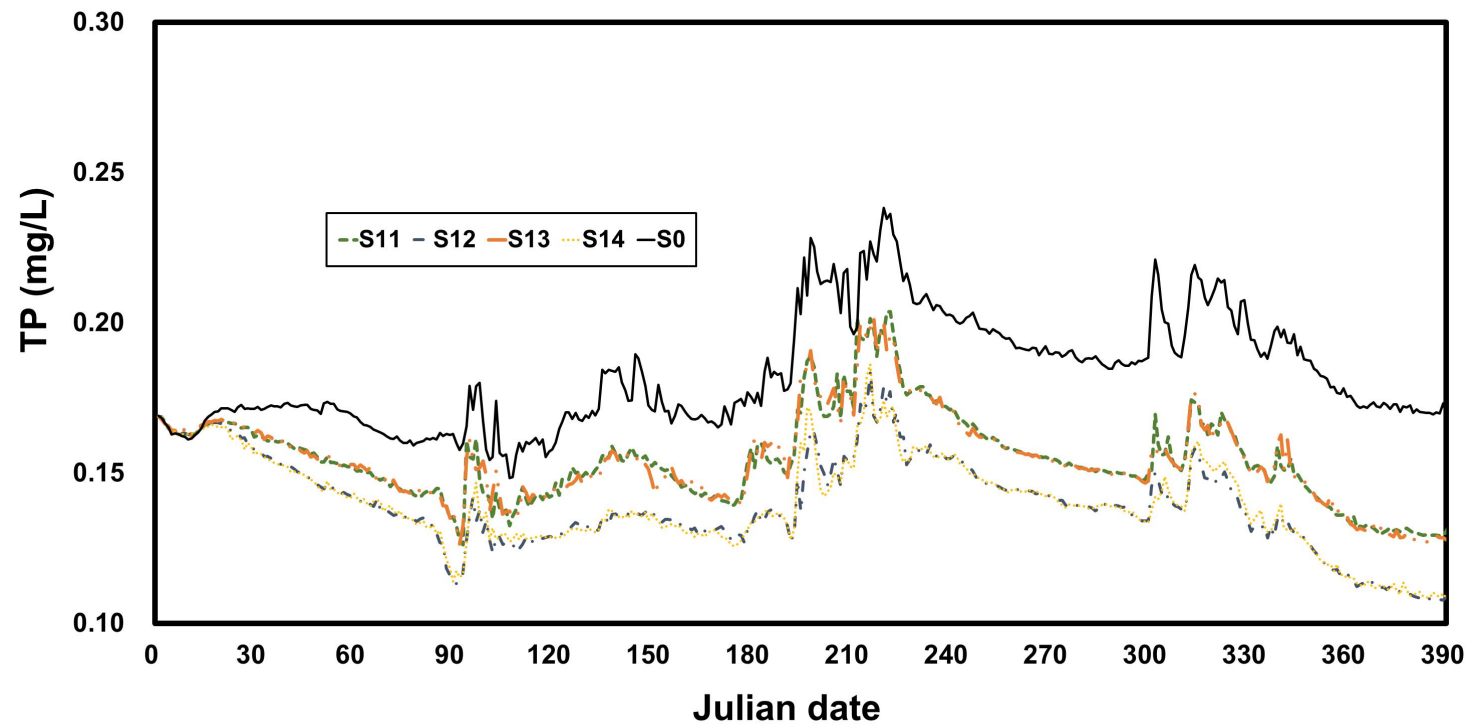


Fig. 6.7. Simulated results of T-P concentration (Zone 3, S0, S11–S14)

나. 간월호 중류 모의 결과

간월호 중류의 경우, 간월호 상류와는 달리 2015년 관측 평균 수질이 0.101 mg/L로 수질이 목표 수질 기준을 소폭 초과하고 있는 수준이나 호소의 수질 개선을 위해 시나리오별 평가를 수행하였다.

Fig. 6.8은 2번 구역 (Zone 2)에 대하여 2015년의 시나리오별 간월호 T-P 수질 변화를 모의한 결과를 나타낸 것이다. 모의 결과, 연평균 수질은 아무 대책을 적용하지 않은 경우, T-P 농도는 0.101 mg/L로 나타났으며, 시나리오를 적용하였을 경우 각각, S1 0.097 mg/L, S2 0.094 mg/L, S3 0.089 mg/L, S4 0.086 mg/L로 나타났다. 상류 (3번 구역)의 경우, 토양의 오염도가 높고 바닥 용출 속도가 빨라 비록 작은 수로로 인해 흐름이 원활하지 않지만, 준설을 시행할 경우 상류 수질의 영향으로 인해 하류에도 수질이 개선되는 것으로 나타났다. 상류 (3번 구역)와 유사하게 S1 시나리오의 경우, 전반적으로 수질은 대책을 적용하지 않은 경우에 비해 수질 농도가 대체적으로 낮게 나타났으나, 일부 시기에 오히려 대책을 적용하지 않은 때보다도 높은 수질을 보이기도 한다.

전체적으로 수질 변화 경향을 살펴보면, 3 구역에서와 유사하게 수질이 악화되고 난 후 수질이 좋아지는 과정에서 대책을 적용하지 않은 경우 경사가 완만하게 나타났는데, 이는 호내 부하량이 높은 상태에서는 담수호의 수질 회복 역량이 낮은 것으로 볼 수 있다. 따라서 비록 준설만으로 담수호의 수질 목표 달성을 이루기는 어려운 것으로 나타났으나 담수호 시스템의 회복탄력성을 높일 수 있는 방안이라 볼 수 있다.

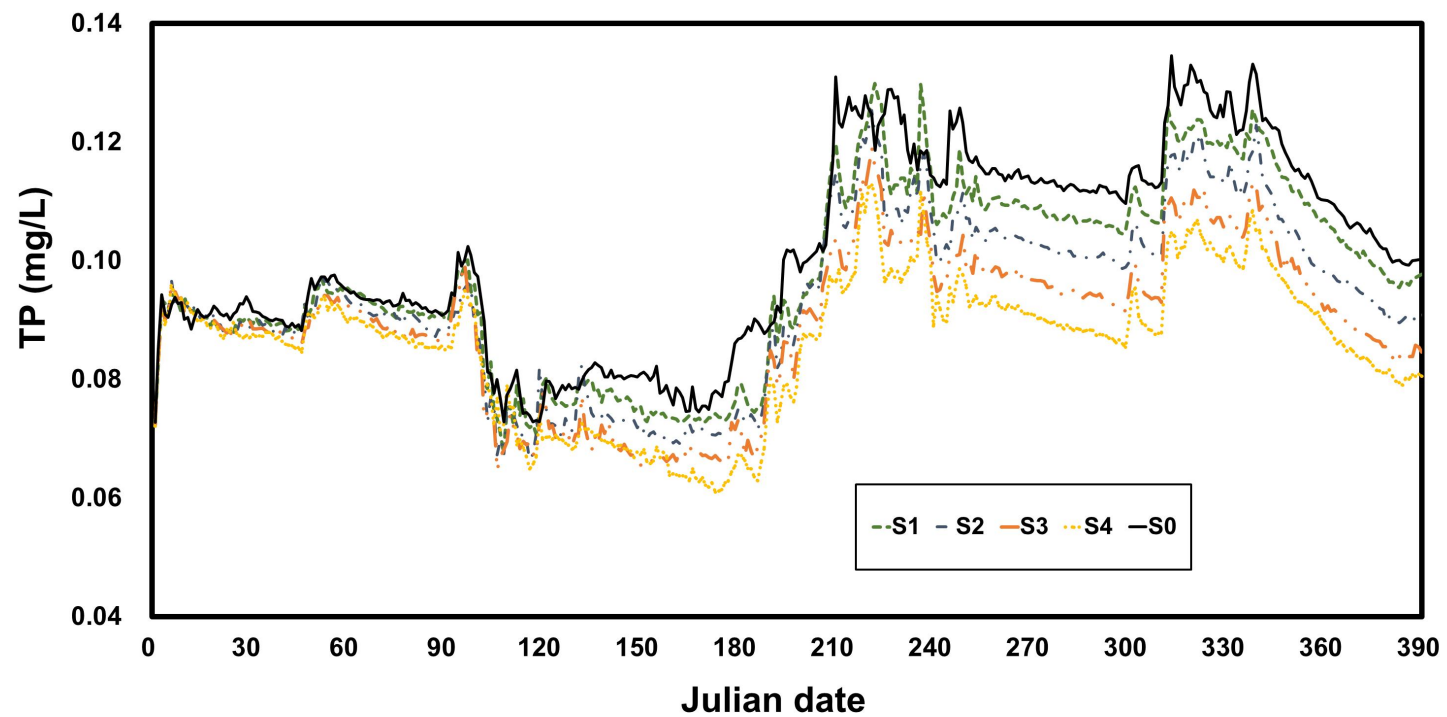


Fig. 6.8. Simulated results of T-P concentration (Zone 2, S0, S1-S4)

Fig. 6.9는 시나리오 S3, S4를 기반으로 2구역에서도 준설을 진행한 시나리오들을 아무 대책을 적용하지 않은 경우와 함께 간월호 T-P 수질 변화 모의 결과를 나타낸 것이다. 특징으로는 시나리오 S3를 기반으로 2번 구역에 준설을 실시한 시나리오와 시나리오 S4를 기반으로 2번 구역에 준설을 실시한 시나리오, 즉 시나리오 S5, S6과 시나리오 S7, S8이 각각 거의 유사하게 나타났다. 이는 2번 구역의 경우, 토양 오염도가 3번 구역에 비해 상대적으로 낮고, 용출 속도 역시 빠르지 않은 상태에서 준설을 실시한다 하더라도 그 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 또한 2번 구역의 경우 1번 구역과 함께 넓은 면적의 호소를 공유하고 있기 때문에 준설에 따른 영향이 크지 않는 것으로 보인다. 따라서 앞선 3번 구역의 결과와 종합적으로 비교해보면, 2번 구역의 준설은 상류 유역의 수질 개선과 회복탄력성을 높이는데 소폭 영향을 미친다고는 할 수 있으나 그 영향이 크지 않고 특히 하류 유역의 수질에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타나 준설에 따른 수질 개선 효과가 적다고 할 수 있다.

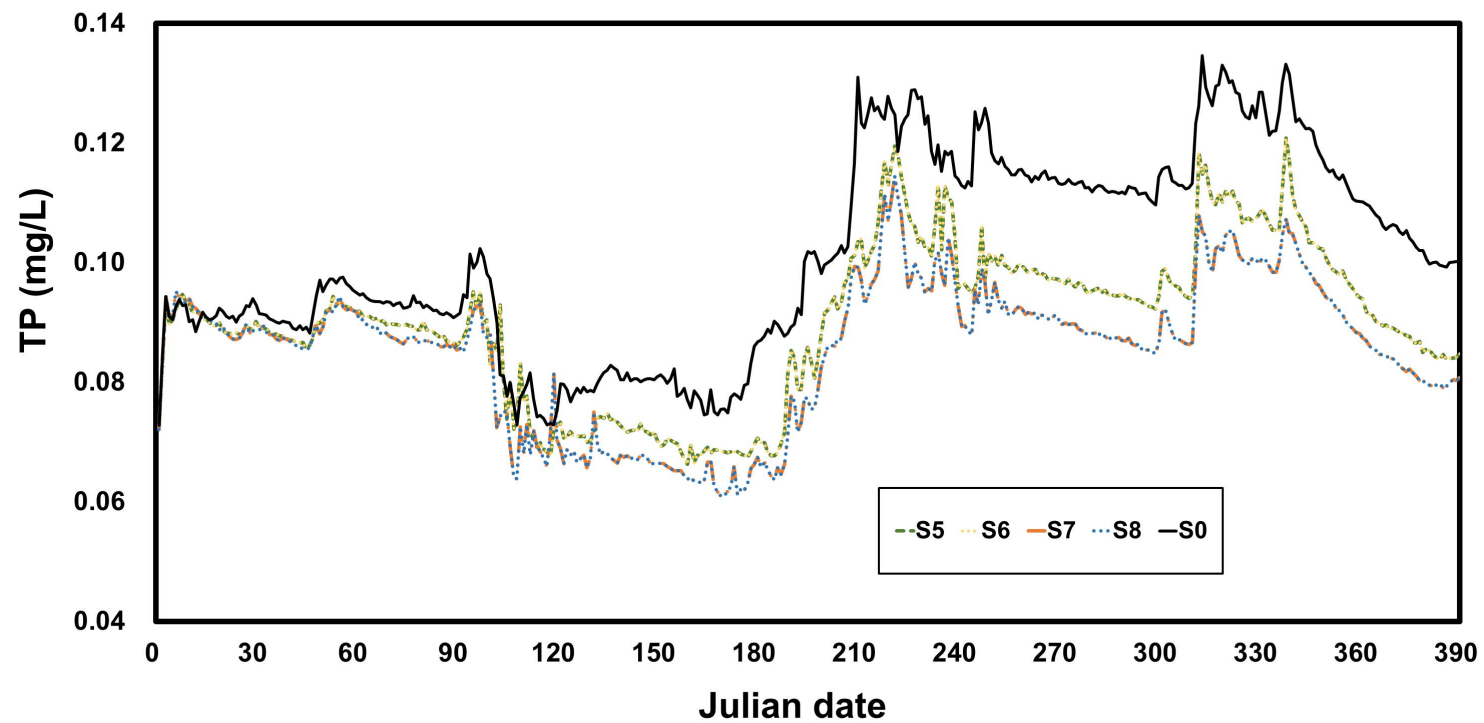


Fig. 6.9. T-P Simulated results (Zone 2, S0, S5-S8)

Fig. 6.10은 간월호 상류 유입부에 위치한 하수처리장에 충전처리시설 증설 (시나리오 S9)과 충전처리 고도화 시설 (시나리오 S10)을 운영하는 경우를 가정하여 중류부 (2번 구역)의 수질 변화를 모의한 결과이다. 연평균 T-P 수질 농도를 비교한 결과, 시나리오 S9와 시나리오 S10의 수질 농도가 각각 0.094 mg/L, 0.089 mg/L로 나타나, 3번 구역과는 달리 2번 구역의 준설 시나리오 결과 (S5-S8)가 더 좋게 나타났다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 중간에 제방으로 인해 흐름이 원활하지 않은 상태에서 상류에 유입 부하를 줄인다고 하더라도 하류까지 영향이 적다고 보여진다. 즉, 상류에 비해 하류는 하수처리장 배출부하량의 유달음이 낮은 만큼 그 영향이 적다고 할 수 있다. 또한 호소의 준설은 호소의 내부적 회복탄력능력을 높이는 방편인 만큼 호소의 전반적인 수질 개선을 위해서는 고농도 오염 토양을 우선적으로 제거하는 것이 중요하다고 보여진다.

또 하나의 특징으로는 3번 구역과는 달리, 일부 시기에 수질 개선 방안을 적용하지 않은 시나리오에 비해 수질이 높게 나타나기도 한다는 점이다. 하지만 전체적으로는 수질이 악화할 시 회복하는 구간에서 기울기가 방안을 적용하지 않은 시나리오에 비해 급하다는 점은 외부 유입 부하를 줄이는 것이 담수호 시스템의 회복탄력성을 높이는데 중요한 역할을 하는 것으로 보인다.

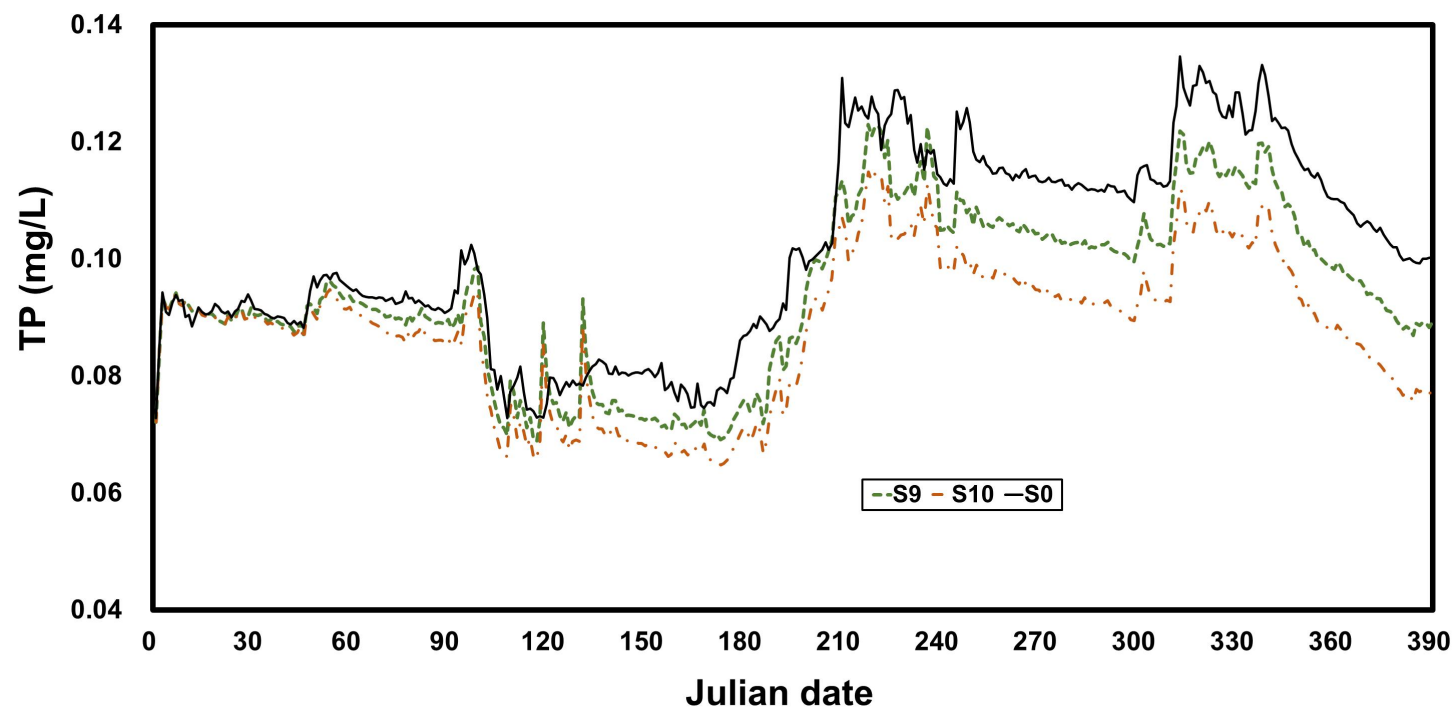


Fig. 6.10. T-P Simulated results (Zone 2, S0, S9-S10)

마지막으로 Fig. 6.11은 복합적인 시나리오를 구성한 경우로, 시나리오 S11과 S12는 시나리오 S7을 바탕으로 하수처리장 총인 처리 시설 개선 적용 시나리오 S9, S10을 적용한 것이며, 시나리오 S13과 시나리오 S14는 시나리오 S8을 바탕으로 하수처리장 총인 처리 시설 개선 적용 시나리오 S9, S10을 적용한 것이다. 즉, 4개 시나리오는 준설 시나리오와 하수처리장 증설 시나리오를 함께 고려한 시나리오를 검토한 결과이다.

모의 결과, 시나리오 S11-S14까지 연평균 T-P 농도는 각각 0.08mg/L, 0.074 mg/L, 0.079 mg/L, 0.073 mg/L로 나타났다. 또한 3번 구역과 마찬가지로 시나리오 S11과 시나리오 S13 그리고 시나리오 S12와 시나리오 S14의 결과가 유사하게 나타났다.

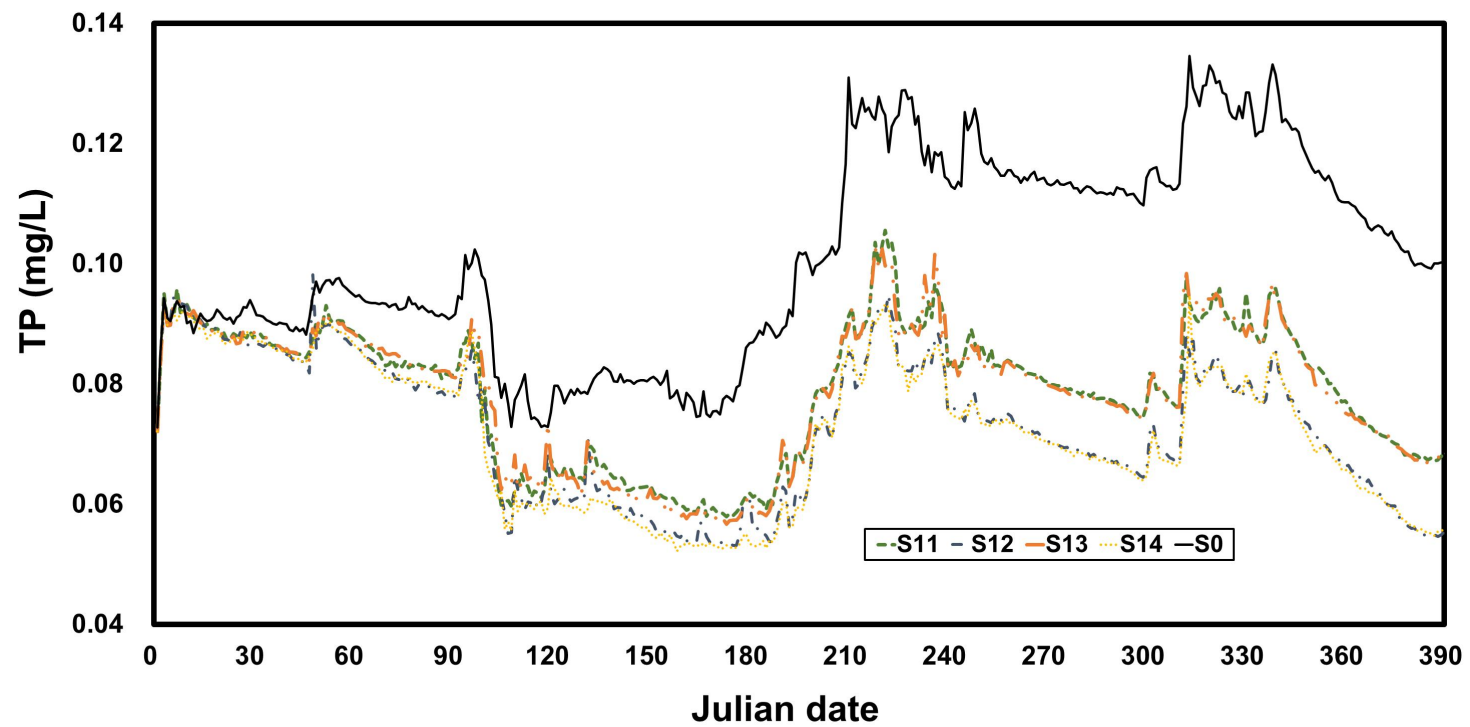


Fig. 6.11. T-P Simulated results (Zone 2, S0, S11-S14)

6.2.2 담수호 구간별 총인 저감 효율 분석 결과

각 시나리오별 모의 결과를 함께 비교해 보면 (Table 6.2), 준설 효과로 인한 저감 효율은 비록 3번 구역에 준설을 시행하더라도 2번 구역에서 더 효율이 높게 나타났으며, 종합적인 T-P 저감 효율 비교에서도 그렇다. 그러나 앞서 기술한 바와 같이 하수처리장에서의 인 유입 부하를 저감 (WWT, Waste Water Treatment)하는 시나리오에서는 서산하수처리장의 지리적 차이로 인해 3번 구역에서의 저감 효율이 더 높은 것으로 나타났다.

2번 구역의 경우, 준설 시나리오 S1부터 시작해서 모든 시나리오에서 목표 수질 등급을 만족하는 것으로 나타났다. 저감 효율 분석 결과를 바탕으로 2번 구역과 3번 구역의 결과를 종합적으로 비교해보면 (Fig. 6.12), 담수호의 내부 부하를 줄이는 것은 내적인 회복탄력능력을 높이고 외부 유입 부하를 줄이는 일은 시스템 가하는 충격 (impact)을 줄인다는 점에서 복합적인 방안 구성이 수질 개선에 가장 유효한 것으로 보인다.

Table 6.2. Annual average T-P concentration and reduction efficiency

Scenario	Annual average T-P concentration (mg/L)	
	Reduction efficiency (%)	
	2015	
	Zone 3	Zone 2
	T-P Standard (IV), < 0.1 mg/L	
Scenario #0	0.183	0.101
	-	-
Scenario #1	0.182	0.097
	0.5%	4.1%
Scenario #2	0.179	0.094
	2.2%	7.4%
Scenario #3	0.175	0.089
	4.6%	13.5%
Scenario #4	0.172	0.086
	6.4%	17.4%
Scenario #5	0.175	0.09
	4.6%	12.2%
Scenario #6	0.175	0.09
	4.6%	12.2%
Scenario #7	0.171	0.086
	7.0%	17.4%
Scenario #8	0.171	0.086
	7.0%	17.4%
Scenario #9	0.169	0.094
	8.3%	7.4%
Scenario #10	0.156	0.089
	17.3%	13.5%
Scenario #11	0.156	0.08
	17.3%	26.3%
Scenario #12	0.142	0.074
	28.9%	36.5%
Scenario #13	0.156	0.079
	17.3%	27.8%
Scenario #14	0.142	0.073
	28.9%	38.4%

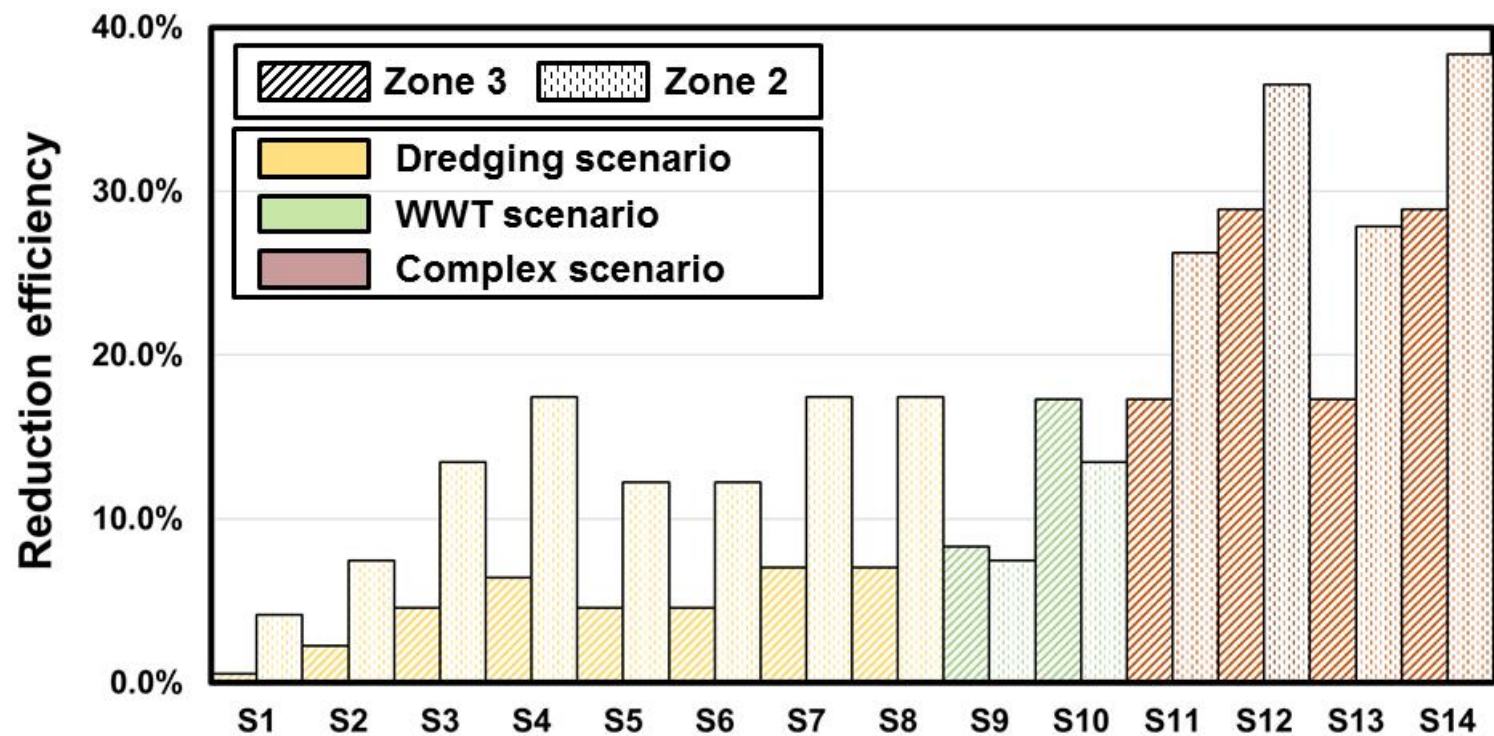


Fig. 6.12. T-P reduction efficiency results (S0, S11–S14)

6.3 시나리오별 동적 회복탄력성 분석

앞선 시나리오별 수질 분석 결과를 목표 수질 달성 여부와 시나리오별 총인 저감효율에 대해 살펴보았으며, 본 절에서는 시나리오별 동적 회복탄력성에 대해 분석을 진행하였다. 앞선 결과에서 본 바와 같이 3번 구역의 연평균 수질로만 각 시나리오를 분석할 경우, 현재 상태를 유지하는 시나리오 S0을 포함하여 시나리오 S1-S6이 목표 수질 0.1 mg/L를 만족하지 못하는 것으로 나타나 목표 수질 기준만으로는 대책 시나리오 간의 상대적 평가가 어렵다. 또한 준설에 따른 내부 부하 저감은 호내로 채부유 하거나 용출되는 부하량을 줄이는 것과 더불어 담수호의 회복탄력성을 높이기 위한 내적 역량을 높이는 것으로 그 상대적 차이를 파악하는 것도 중요하다고 할 수 있다. 하지만 목표 수질을 만족하지 못하는 상태에 대해서는 총인 저감 효율 정도의 단순한 수치에 의해서만 수질 개선 정도의 분석이 가능하고, 수질 개선 대안별로 담수호의 수질 악화에 저항하는 내적 능력이 얼마나 개선되었는지를 정량적으로 판별하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이런 점을 보완하고 수질 개선 대안별로 회복탄력 능력의 향상 등을 비교하기 위하여 동적 회복탄력성 기반으로 수질 개선 대안을 평가하였다.

Butler et al. (2014)와 Sweetapple et al. (2016)이 회복탄력성 회복은 극한의 상태 혹은 예외적인 상태 (exceptional conditions)에 대해 분석하는 것이 유의미하다고 기술한 바 있으므로 본 연구에서는 각 수질 개선 대안별로 연평균 수질을 상회하는 조건에 대해 담수호의 기능 손실로 보았고, 수질 기준을 초과하는 시점부터 다시 연평균 수질 기준을 만족하는 시점까지를 담수호의 수질 회복능력이라 가정하였다.

본 연구에서는 앞서 <3.1.1 담수호 수자원의 회복탄력성 정의>에서 준설 시나리오를 선제적 수질 개선 대안, 하수처리장 운영을 반응적 수질 개선 대안으로 가정한 바에 따라, 동적 회복탄력성 분석을 구별하여 분석하였다. 즉, <6.2 시나리오별 수질 모의 결과 분석>에서 전체 시기

에 대해 하수처리장 운영을 일률적으로 하는 시나리오뿐만 아니라 수질 악화 시에 하수처리장 운영을 달리하는 시나리오를 추가하여 수질 악화에 적응하는 시나리오 (adaptive scenario)로 새롭게 구성하였다.

6.3.1 준설 시나리오별 동적 회복탄력성 분석

준설 시나리오에 따른 동적 회복탄력성을 분석에 앞서 Fig. 6.13과 같이 모든 시나리오가 목표 수질 0.1 mg/L를 상회할 뿐만 아니라 2015년 동안 수질 기준 5등급 (0.15 mg/L)을 초과하고 있으므로, 담수호의 수질 개선 능력 회복에 따른 결과를 목표 수질 기준 초과만으로 단순히 비교하기 어려운 점을 알 수 있다. 또한 동적 회복탄력성 분석의 대상이 되는 구간을 살펴보면, Fig. 6.13의 녹색원과 같이 수질이 악화되는 구간이 2015년에 2회에 걸쳐 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 동적 회복탄력성을 분석하기 위하여, 각 시나리오별 연평균 수질을 담수호 시스템의 수질 악화를 겪고 있지 않은 상태라고 가정하였고, 연평균 수질을 크게 초과하는 두 가지 경우를 대상으로 하였다.

연평균 수질을 초과하여 담수호 수자원 시스템의 기능적 손상이 일어나는 두 가지 경우를 본 연구에서는 개별 대상으로 분석하였는데, Simonovic and Arunkumar (2016)에 따르면 시스템의 성능 손실이 일어나고 시스템의 성능이 일정 회복한 후 다시 발생하는 시스템의 성능 손실 사건은 회복탄력성 분석을 위해 개별적으로 분석할 필요가 있다고 한 바 있다. 따라서 Simonovic and Arunkumar (2016)의 연구를 참조하여, 본 연구에서는 2015년의 두 번의 수질 악화 상황을 대상으로 앞선 식 (3-8)과 식 (3-9)를 개별적으로 적용하여 동적 회복탄력성을 분석하였다. 만약 두 가지 경우를 개별적으로 분석하지 않는다면, 첫 번째 사건(event)에서의 시간이 지속하여, 식 (3-9)에서 $(t-t_0)$ 의 값이 상대적으로 큰 값을 나타내게 되므로 두 번째 사건에서의 회복탄력성의 값이 매우 작게 나타나 왜곡된 결과를 제시할 수도 있다.

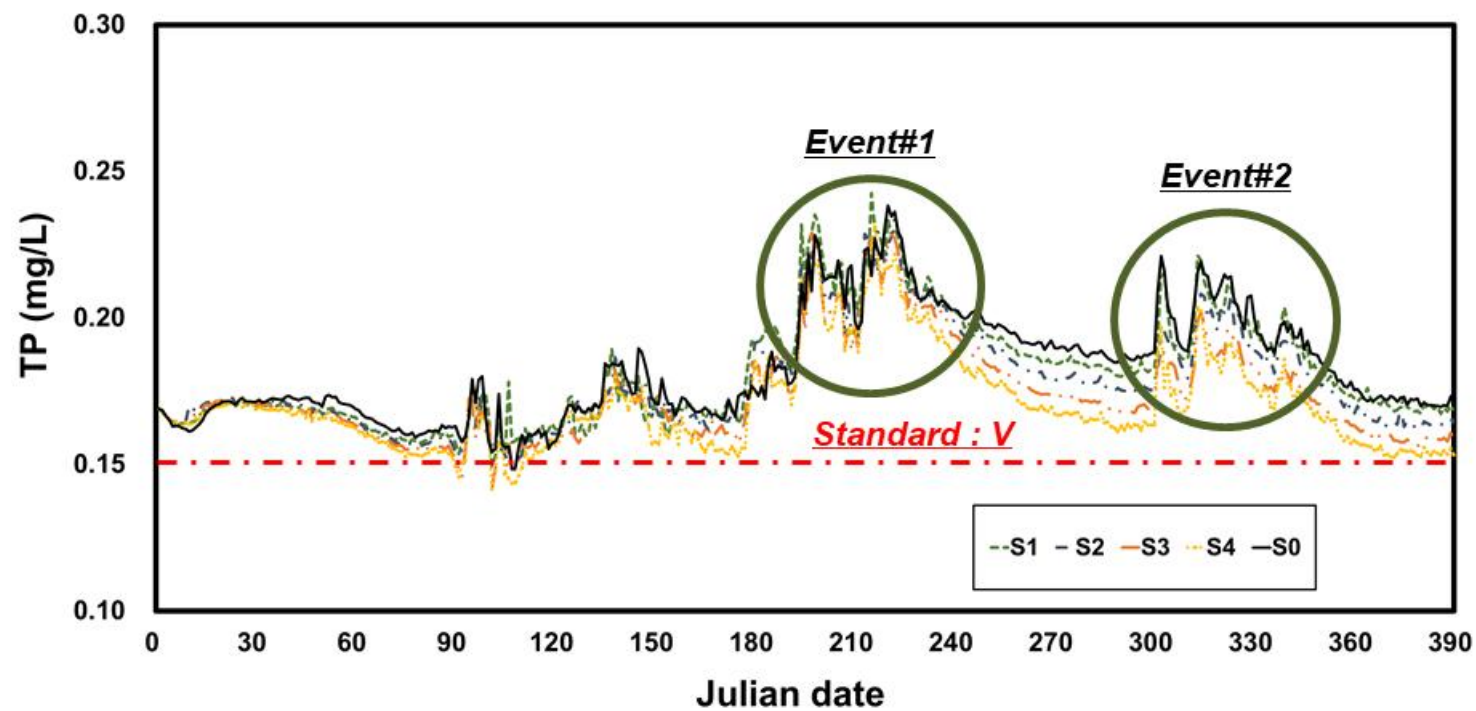


Fig. 6.13. T-P concentration change in estuarine reservoir (S0, S1-S4)

본 연구에서는 준설 시나리오가 3번 구역에 유효한 것으로 나타났고, 준설이 어느 정도 진행된 시나리오인 시나리오 S3과 시나리오 S4에 대하여, 준설을 실시하지 않은 현재 시나리오인 시나리오 S0과 동적 회복 탄력성 분석 결과를 비교하였다. 우선, 각 시나리오별 수질 모의 결과를 비교해보면 Fig. 6.14-6.16과 같다. 결과를 살펴보면, 세 가지 시나리오 (S0, S3, S4)에서 유사한 시점에서 각 시나리오별 수질 평균을 초과하는 것으로 나타났으나, 다시 수질 평균을 만족하는 시점은 각 시나리오별로 다르게 나타났다. 또한 준설 시나리오의 경우, 290일 근방에서 수질 수준을 회복하는 것으로 나타났으나 현재 상태의 담수호 수자원 시스템은 수질 수준을 회복하기까지 상당한 시간이 소모되는 것을 확인할 수 있다. 이는 수질 기준을 초과하는 담수호의 수자원 효율성이 낮다고 가정할 경우, 현재 담수호 시스템의 경우 수자원 활용성이 상당히 떨어짐을 알 수 있고 준설로 인해 긴 기간은 아니지만 수자원 활용성을 높일 수 있는 것으로 나타났다.

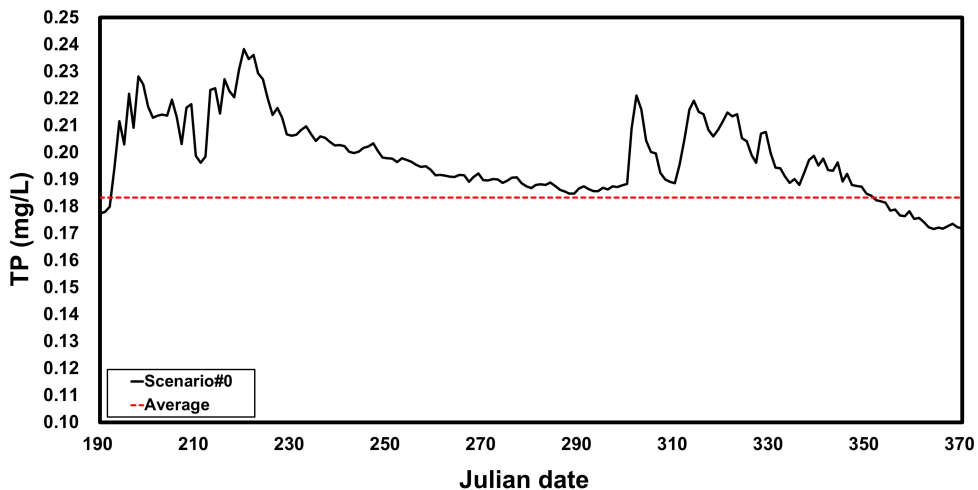


Fig. 6.14. T-P concentration change in estuarine reservoir (S0)

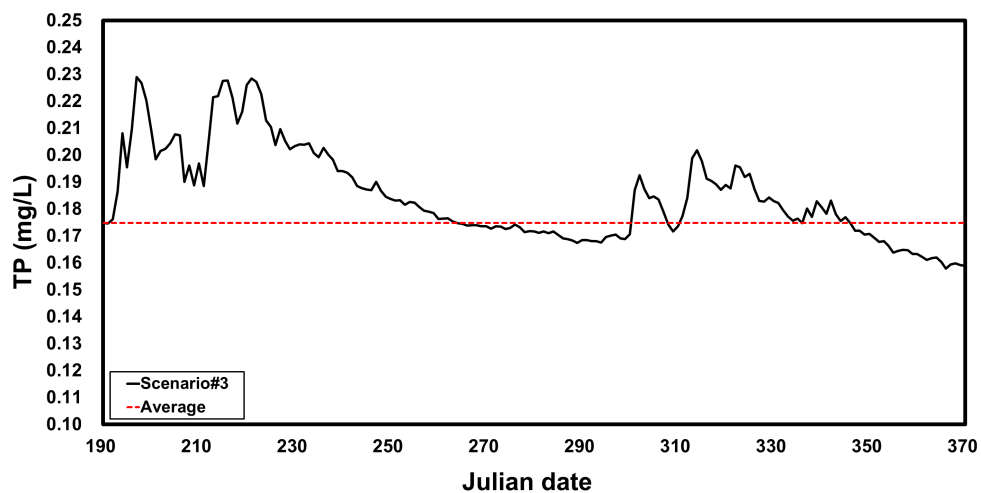


Fig. 6.15. T-P concentration change in estuarine reservoir (S3)

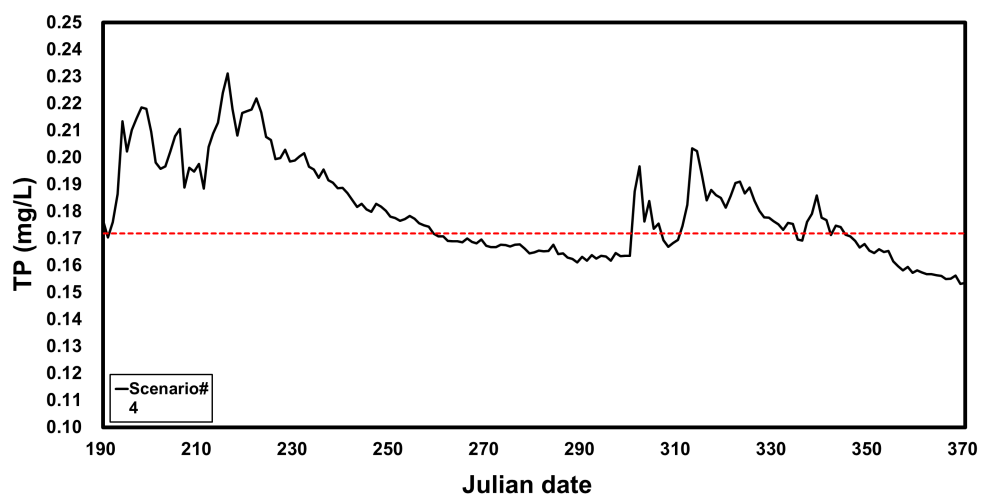


Fig. 6.16. T-P concentration change in estuarine reservoir (S4)

이를 각각 시나리오별로 시간별 회복탄력손실량을 분석해보면 각각 Fig. 6.17-6.19와 같다. 시간별 회복탄력손실량을 회복탄력 분석에 유효한 시간의 기간으로 총합을 구하면 총 회복탄력성 손실량이 되며, 이를 역수를 취하면 정적 회복탄력성의 값이 된다. 우선, 회복탄력손실량을 살펴보면 (Fig. 6.17), 앞선 결과와 유사하게 현재 상태의 담수호는 수질이 악화되는 상황에서 다시 평균 수질을 회복하지 못하고 360일경까지 회복탄력성 손실이 이어지는 것으로 나타났다. 세 가지 시나리오에 대해 총 회복탄력성 손실량 값을 구해보면, S0 시나리오의 경우 -2.84로 나타났고, S3 시나리오의 경우 -2.20 그리고 S4 시나리오의 경우 -2.09로 나타났다. 이를 통해 정적 회복탄력성을 비교해보면, S0 시나리오의 경우 0.35로 나타났고, S3 시나리오의 경우 0.45 그리고 S4 시나리오의 경우 0.47로 나타났다.

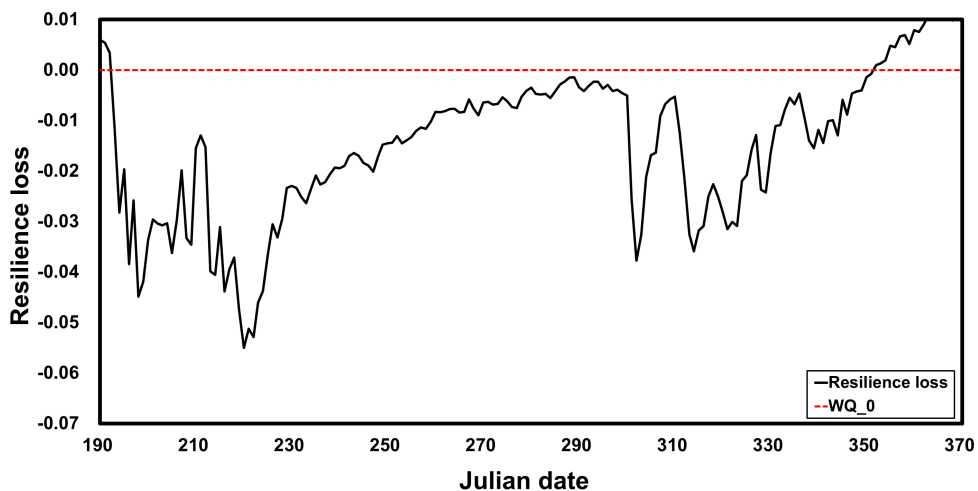


Fig. 6.17. Resilience loss (S0)

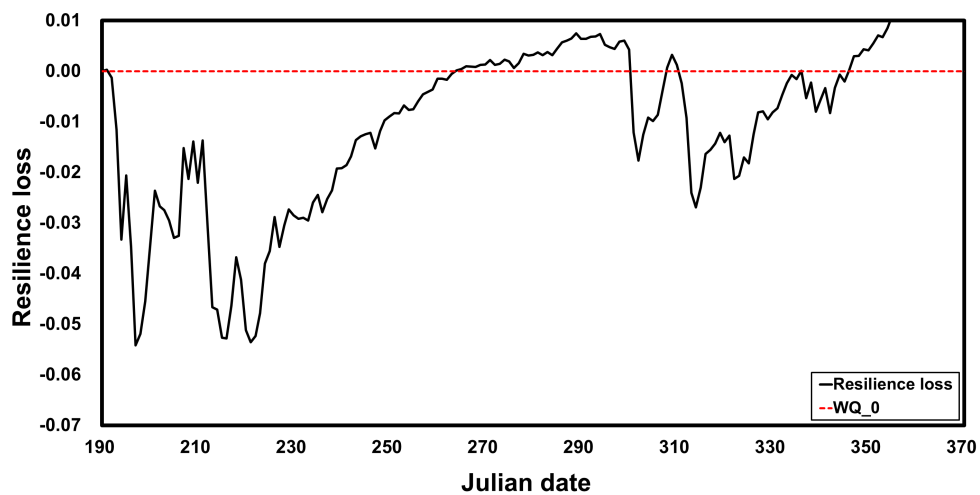


Fig. 6.18. Resilience loss (S3)

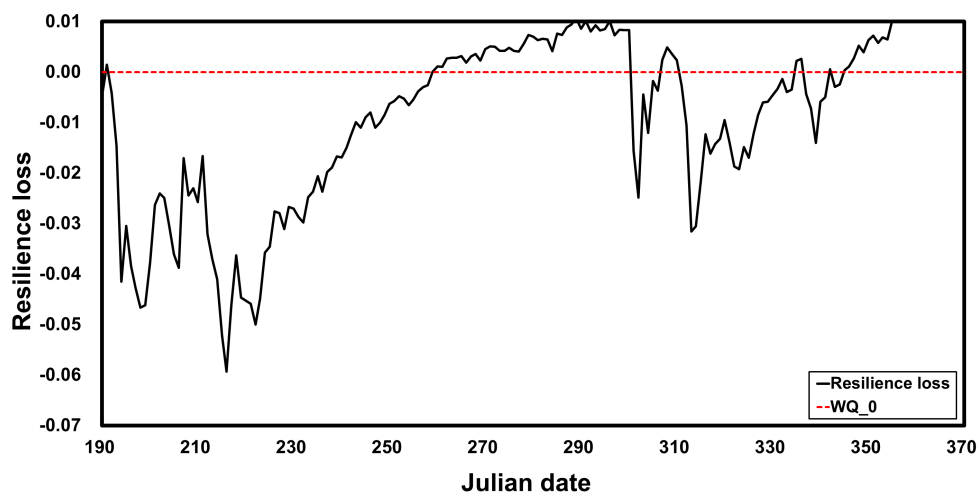


Fig. 6.19. Resilience loss (S4)

마지막으로 앞선 결과를 통해 회복탄력성을 비교해보면, Fig. 6.20-6.22와 같다. 본 연구에서는 회복탄력성의 총합을 대표적인 회복탄력성이라 하였고, 동적 회복탄력성 분석을 위한 보조 지표로서 강건성(robustness), 자원효율성(resourcefulness), 신속성(rapidity) 3가지 차원을 활용하였다. 회복탄력성 변화에 따른 지표들을 살펴보면, 수질이 악화할 시에 시스템의 최대 악화 정도가 준설을 통해 개선됨을 확인할 수 있었으며, Fig. 6.21과 Fig. 6.22에서 보는 바와 같이 준설 시나리오별로는 큰 차이를 보이지 않았다.

수질이 악화하는 순간부터 시스템이 정상으로 돌아오는 과정에서의 회복 경사를 나타내는 자원효율성을 살펴보기에 앞서, 담수호 수자원에서의 자원효율성의 의미는 회복을 빨리 할수록 자원을 활용할 수 있는 가능성이 높아진다는 의미이다. 따라서 Fig. 6.20과 같이 준설을 시행하지 않은 경우 수질 회복을 이루지 못하고, 상당 기간 수질 회복이 지체되어 자원효율성이 상당히 떨어진다고 할 수 있다. 단, Fig. 6.21과 Fig. 6.22와 같이 일부 준설을 통해서 2번째 수질 악화 event가 발생하기 전 수질의 회복을 이룰 수 있다면 자원효율성을 확연히 높일 수 있는 것으로 보인다.

마지막으로 신속성을 살펴보면, 사실 강건성 및 자원효율성의 경우 준설 시나리오인 S3와 S4가 큰 차이를 보이고 있지 않았으나, 신속성에서 준설을 더 많이 시행한 S4의 경우가 더 작은 값을 나타내고 있다. 따라서 담수호 수자원의 수자원 활용 기간을 확보하기 위해서는 담수호의 준설을 시나리오 S3보다 더 진행해야 할 것으로 보이나 비용 및 시간적인 문제를 고려한다면 강건성 및 자원효율성에서 큰 차이를 보이고 있지 않으므로 연중 수자원의 활용 측면에서는 시나리오 S3 정도의 수질 개선 방법도 충분히 고려할 수 있을 것이라 보여진다.

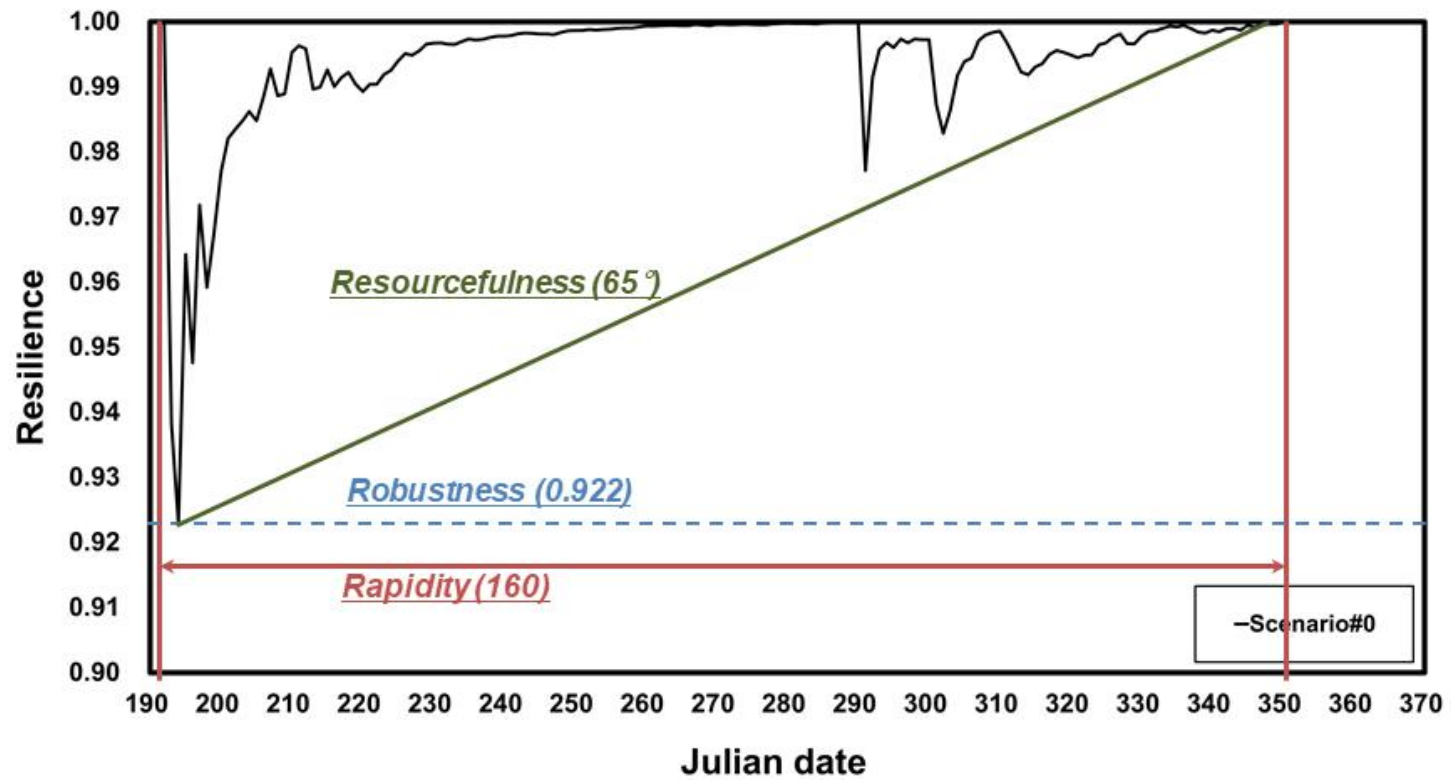


Fig. 6.20. Resilience analysis (S0)

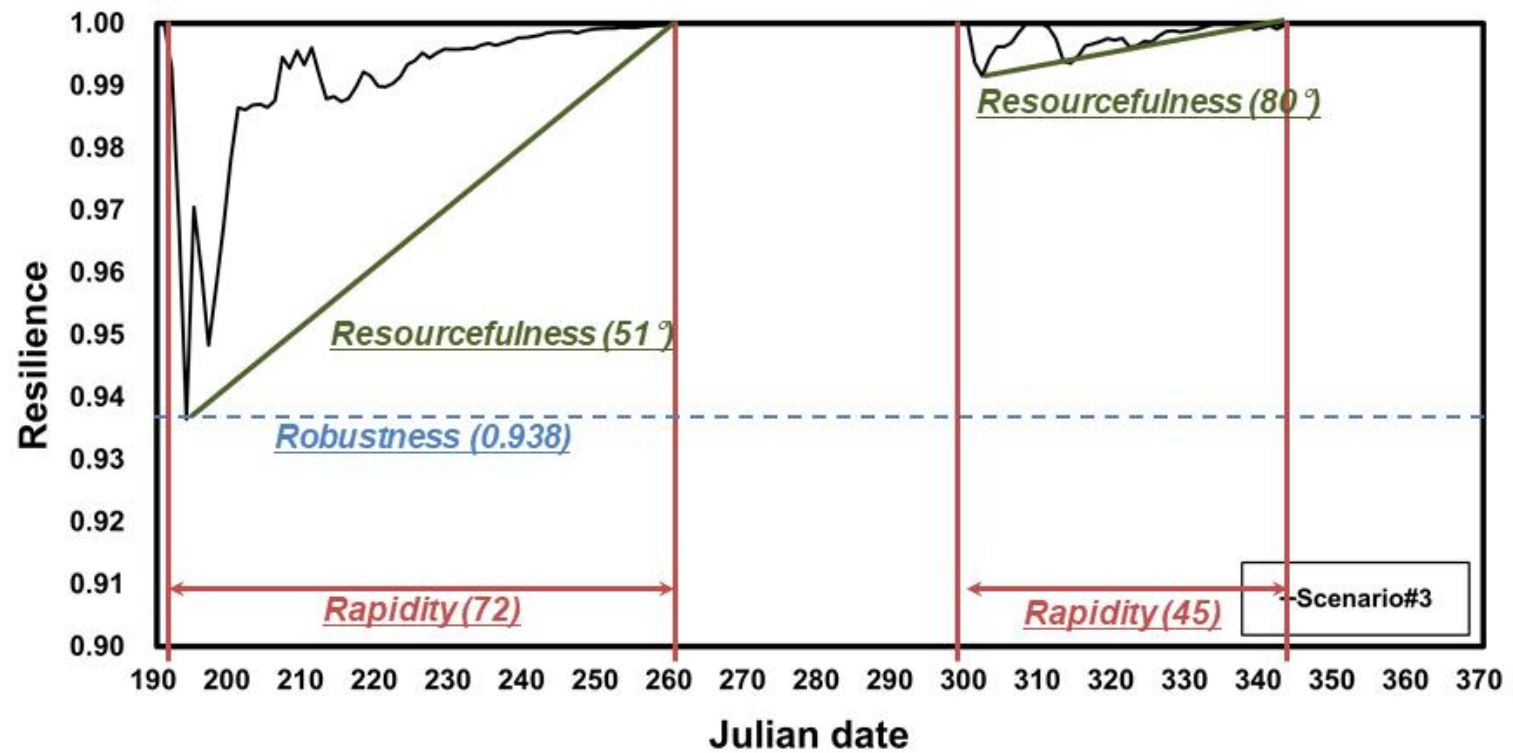


Fig. 6.21. Resilience analysis (S3)

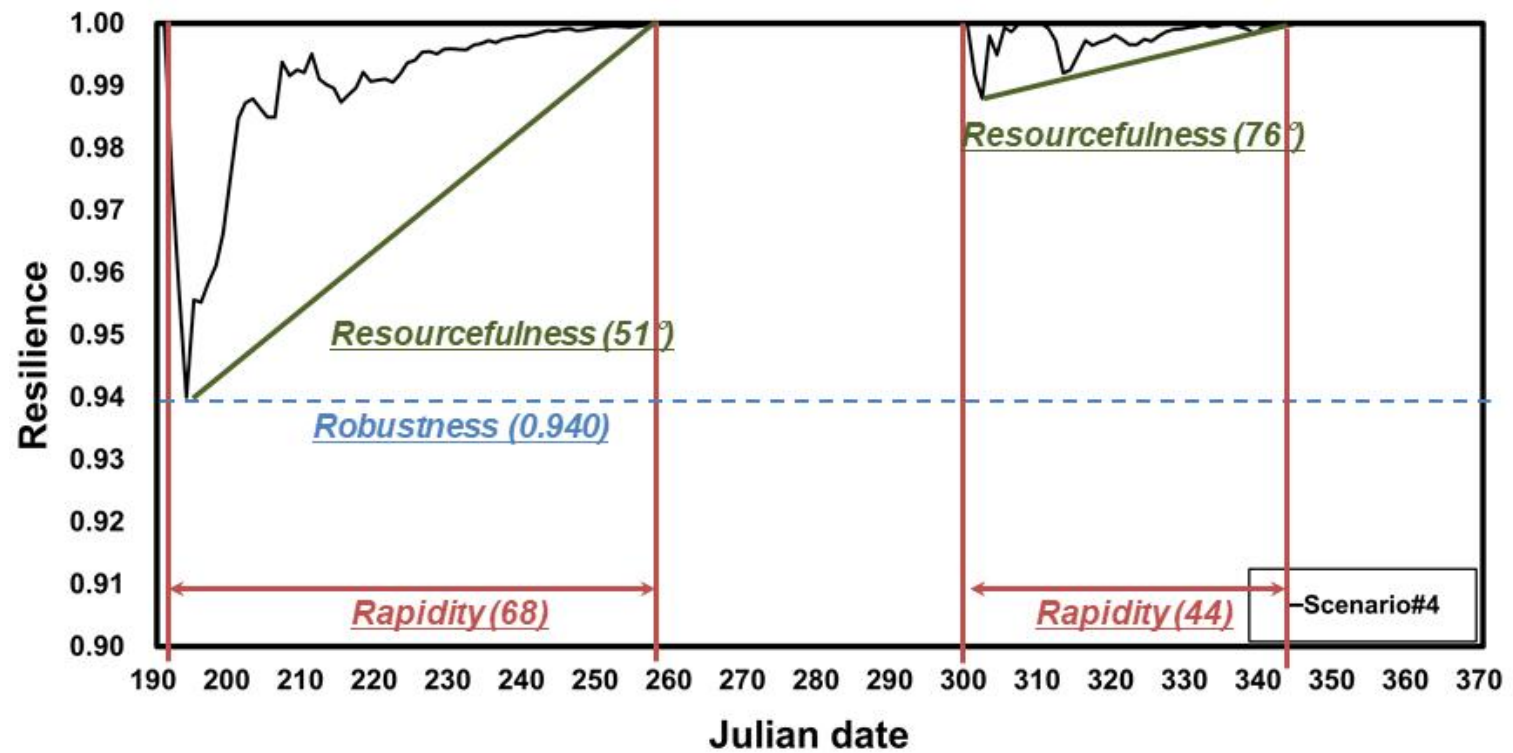


Fig. 6.22. Resilience analysis (S4)

6.3.2 하수처리장 운영에 따른 동적 회복탄력성 분석

앞선 준설 시나리오에 대한 연평균 T-P 수질 농도와 회복탄력성 분석 결과, 준설을 아무리 시행한다고 하더라도 담수호 수자원의 활용성을 높이는 데는 한계를 지니고 있으므로 담수호 수질 개선 및 수자원의 활용성을 높이기 위해서는 추가적인 대안이 필요하다. 본 연구에서는 하수처리장 방류수의 부하량을 저감하는 시나리오를 수질이 악화하는 구간에 앞서 시행할 경우에 대해 추가적인 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 S3 시나리오에 서산공공하수 처리장으로부터 배출부하량을 시기별 운영을 통해 줄이는 시나리오를 검토하였으며, 본 시나리오를 반응형 대안 (혹은 적응형 대안, adaptive scenario)으로 하였다.

Fig. 6.23은 반응형 대안에 대한 회복탄력성을 분석한 결과이다. 분석 결과, 준설 시나리오에 비해 강건성 및 신속성에서 우수한 결과를 보이고 있으며, 특히 담수호의 유입부하량을 줄임으로써 외부 요인을 저감하는 것은 준설 시나리오와는 달리 2번째 event에서 회복탄력성 손실이 거의 없는 것으로 나타나, 담수호 시스템에서 하수처리장 방류수의 영향이 크다는 것을 방증한다고 할 수 있다. 하지만, 자원효율성의 경우 오히려 준설 시나리오보다 큰 값을 보이고 있는데, 이를 보완하여 자원효율성을 늘리기 위해서는 보다 효율적인 하수처리장의 운영이 필요한 것으로 보인다.

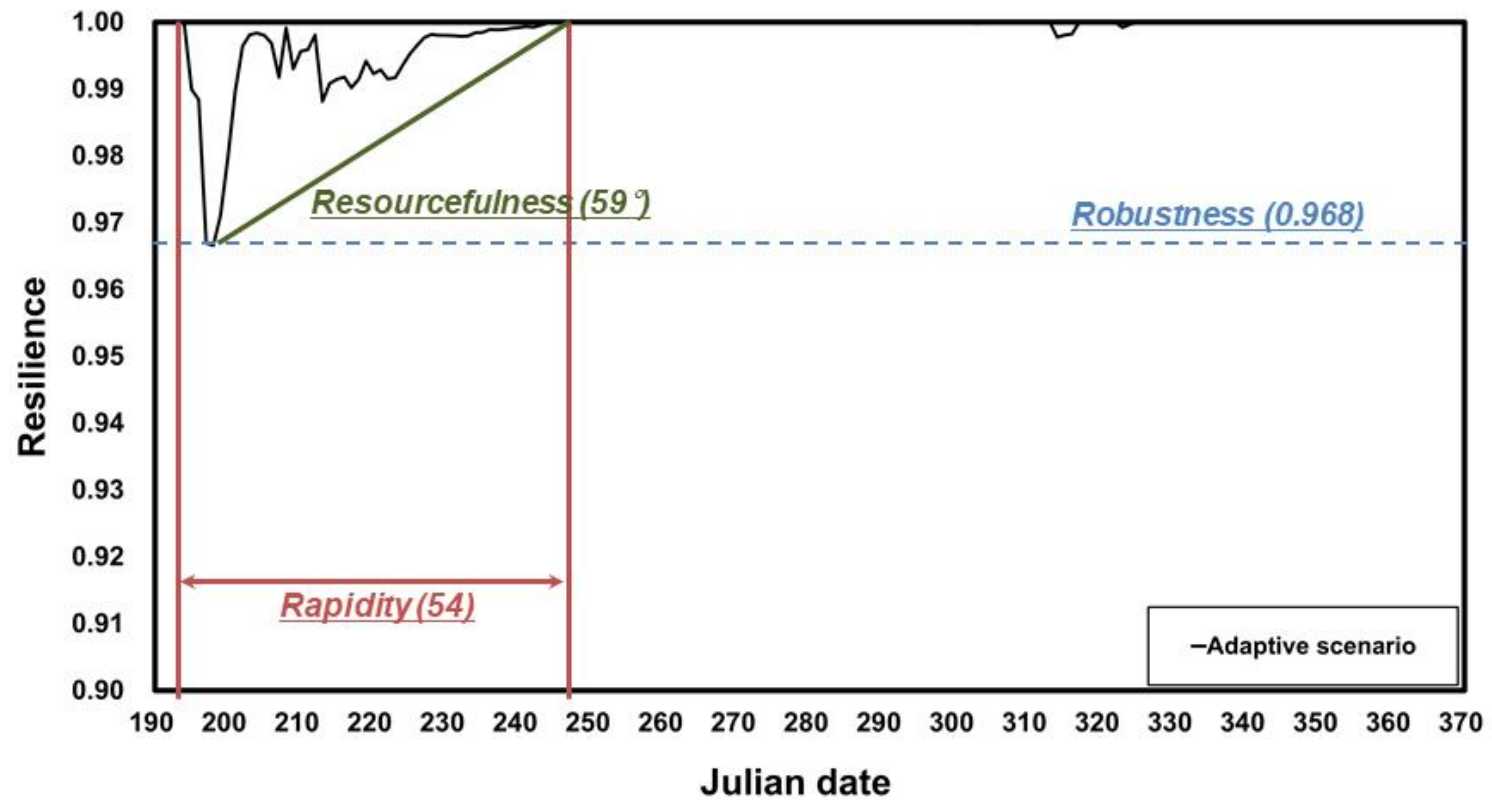


Fig. 6.23. Resilience analysis (adaptive scenario)

6.3.3 시나리오별 정적 및 동적 회복탄력성 비교

앞선 회복탄력성 분석 결과를 요약해 보면 Table 6.3과 같다. 본 결과를 살펴보면 적응형 시나리오를 통해 외부 유입부하량을 시기별로 조절하는 것만으로도 정적 회복탄력성 지표인 총 회복탄력성이 준설 시나리오만 적용한 것에 비해 거의 3배 가량 좋아지는 것으로 나타났으나, 정적 회복탄력성에서는 확인하지 못하는 자원효율성 측면이 오히려 나빠지는 결과를 보임을 알 수 있다. 물론 수질의 악화 정도가 낮고 신속성이 높아 수자원 시스템의 운영은 적응형 시나리오가 우수하다고 할 수 있으나 자원효율성의 측면에서 수질 개선 방안을 검토한다면 정적 회복탄력성만으로는 간과하는 부분이 생길 수도 있다. 또한 동적 회복탄력성 분석을 통해 준설 시나리오의 효율성을 서로 비교 가능하였으며, 신속성을 우선시 하는 대안 설계가 아니라면, 준설을 시나리오 3 수준까지 시행하는 것만으로도 담수호의 회복탄력성을 효율적으로 높일 수 있다는 것을 알 수 있다.

Table 6.3. Resilience analysis result by scenario

Scenario	Static	Dynamic		
	Total resilience	Robustness	Rapidity	Resourcefulness
Scenario #0	0.35	0.922	160	65°
Scenario #3	0.45	0.938	117	51°
Scenario #4	0.48	0.940	112	51°
Adaptive scenario	1.29	0.968	54	59°

제 7 장 요약 및 결론

본 연구에서는 담수호의 수자원 관리 방안의 효율성 및 수질 개선 효과를 분석하기 위하여 수질 개선 시나리오별 연평균 수질 평가 방법과 회복탄력성의 개념을 통한 평가 방법을 이용하였다. 특히, 담수호의 수자원의 시간적 변화에 따른 회복탄력성을 분석하기 위하여 동적 회복탄력성을 강건성 (robustness), 자원효율성 (resourcefulness), 신속성 (rapidity) 지표와 함께 분석하였다. 마지막으로 정적 회복탄력성과 동적 회복탄력성 결과 비교를 통해 동적 회복탄력성 방법의 효용성을 평가하였다.

본 연구에서는 시나리오별 유역 및 호소 수질 변화 모의를 위하여 SWAT-EFDC 연계 모형을 이용하였으며, 담수호의 준설에 따른 내부 부하량 감소 시나리오와 상류에 부하량이 높은 총인 부하를 가지는 하수처리장 방류수 전처리 시나리오로 총 14개 시나리오를 구성하여 담수호의 연평균 수질 변화를 분석하였다.

2015년에 대해 지점별 연평균 수질 변화를 분석한 결과, 상류의 경우 담수호의 목표 수질을 만족하기 위해서는 상류에 유달율이 높은 상태로 높은 부하량을 배출하고 있는 하수처리장에 대한 총인 처리 시설의 개선 및 준설이 중요한 요인으로 분석되었다. 또한 추가적인 수질 개선을 위해서는 준설, 총인처리시설에 더해서 유역 비점 저감 시나리오를 추가적으로 고려해야 할 것으로 보인다. 그에 반해 중류의 경우, 준설 시나리오 S1부터 시작해서 모든 수질 개선 시나리오에서 목표 수질 등급을 만족하는 것으로 나타났다. 간월호 상류와 중류의 저감효율 분석 결과를 바탕으로 종합적으로 살펴보면, 담수호의 내부 부하를 줄이는 것은 내적인 회복탄력능력을 높이고 외부 유입 부하를 줄이는 일은 시스템 가하는 충격을 줄인다는 점에서 복합적인 방안 구성이 수질 개선에 가장 유효한 것으로 나타났다.

앞선, 연평균 수질 평가를 통해 간월호 상류에서 준설 시나리오만을 적용한 S1-S6 시나리오는 모든 시나리오에서 연평균 목표 수질을 만족

하지 못하는 것을 확인하였다. 하지만 준설을 통한 담수호의 내부부하량을 저감하는 일은 담수호 내부에서의 오염물질 부하량을 저감하는 요소일뿐만 아니라 수질 악화 시에 수질 개선에 영향을 주는 중요한 요인이므로 담수호의 수질 악화에 대응하는 내적 역량을 평가할 수 있다는 점에서 중요하다. 따라서 본 연구에서는 준설을 일정 수준 이상 시행한 시나리오 S3과 S4에 대해 동적 회복탄력성을 분석하였으며, 분석 결과 준설을 60% 이상 진행한 시나리오 S3가 준설을 80%이상 진행한 시나리오 S4보다 담수호 수자원의 수질 개선을 위한 동적 회복탄력성에 큰 차이를 보이고 있지 않았다. 즉, 담수호 준설에 따른 시간 및 비용적 한계를 고려한다면 준설은 시나리오 S3의 수준에서 고려하고 추가적으로 담수호의 회복탄력성을 높이기 위한 방안을 검토하는 것이 효율적인 담수호 수질 개선 방안으로 보인다.

본 연구에서는 앞선 준설 시나리오에 더해서 담수호 수자원 시스템의 회복탄력성을 높이기 위해 시나리오 S3에 담수호의 수질이 악화하는 시기에 앞서 반응형 대안을 검토하였다. 즉, 담수호의 배출부하량 저감을 수질이 악화되는 시기에 추가적으로 실시하여 분석하였다. 분석 결과, 준설 시나리오만을 고려하는 것에 비해 수질 악화를 유발하는 외부 요인을 저감함으로써 담수호의 회복탄력성 지표들이 상당히 개선됨을 보였다. 하지만 자원효율성 측면에서는 큰 변화를 보이고 있지 않아 이를 개선하기 위해서는 하수처리장의 효율적 운영 등이 추가적으로 고려되어야 할 것으로 보인다.

수질 개선 방안들에 대해 종합적으로 살펴보면, 수질이 악화하는 시나리오에 대해 담수호의 수질 회복 탄력성을 높이기 위해서는 외부적인 요인인 총인의 호내 유입 저감뿐만 아니라 호내 준설을 통한 내부 부하량 감소 및 수질 회복 능력을 도울 수 있는 추가적인 방안들이 주요하게 검토되어야 할 것으로 보인다.

본 연구의 동적 회복탄력성 분석 기반 담수호 수질 관리 방안의 평가 방법은 기존에 연평균 수질 모의를 통해 목표 수질 달성 여부의 평가 방

법에 더해서 담수호의 회복탄력 능력을 시간 요인을 고려하여 평가하는 방법으로 기존의 여러 회복탄력성 관련 연구와 문맥을 같이 한다고 할 수 있다. 그러나 이러한 회복탄력성에 대한 개념을 담수호 수질 관리에 도입한 사례는 거의 유일하다고 할 수 있으며, 담수호의 회복탄력성을 평가하고 회복탄력성을 높이는 방안을 도출하는 것은 담수호의 수질 악화에 대한 자연 회복 능력과 담수호 수자원 시스템의 지속가능성을 확보할 수 있다는 측면에서 중요한 연구라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법은 추후 담수호 수자원 시스템의 회복탄력성 분석 연구에 기초 자료로 활용될 수 있을 것이며, 담수호의 지속가능한 수자원 관리를 위한 의사결정지원을 돕는 도구로 활용 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. 강노을, 2012. 기후변화 불확실성 하의 용수공급계획을 위한 로버스트 의사결정의 적용성 검토. 서울대학교 석사학위논문.
2. 강두선, 김태웅, 안재현, 2013. 재해에 대비한 수자원 시스템의 지속가능성 및 복원성에 관한 연구. 한국방재학회논문집 13(1), 309-315.
3. 강문성, 2002. 인공신경망 원격탐사기법과 비점오염모델을 이용한 오염총량모의시스템 개발. 서울대학교 박사학위논문.
4. 강문성, 2010. 농업비점오염 저감을 위한 영농방법 개선 기법 개발. 전원과 자원, 4: 40-50.
5. 강성현, 김은희, 구분주, 2010. 연안통합관리를 통한 시화호 간척지의 지속가능한 개발. 한국습지학회지 7(1), 93-106.
6. 국립환경과학원, 2014. 새만금 수질개선효과 정량화 모델 구축(II). 환경부.
7. 김광문, 2012. HSPF와 EFDC를 이용한 보 설치 전·후의 수리 및 수질 변화 분석. 경북대학교 박사학위논문
8. 김계웅, 강문성, 송인홍, 송정현, 박지훈, 전상민, 장정렬, 김진수, 2016. 물꼬 관리 및 완효성 비료 시비가 포장단위 논에서의 영양물질 배출부하량에 미치는 영향. 한국농공학회논문집 58(1), 1-10.
9. 김병일, 신사철, 김두연, 2014. 댐 홍수조절기능의 회복탄력성 산정. 대한토목학회논문집 34(6), 1919-1924.
10. 김세원, 김동섭, 최광순, 2009. 시화호 인공습지 운영현황 및 수질정화기능 개선방안. 한국수자원학회지: 물과 미래 42(7), 49-55.
11. 김영도, 강부식, 홍일표, 노희진 2011. 도암댐 수질관리를 위한 통합탁수관리 시스템 구축. 한국하천협회지 7(1), pp. 85-91.
12. 김웅석, 심규범, 갈병석, 2013. 저수지 준설에 의한 수질개선 효과분석. 한국방재학회논문집 13(2), 327-336.
13. 김종건, 이수인, 신재영, 임정하, 나영광, 주소희, 최중대, 2018. 새만금 유역에서 논 최적관리기법의 수질개선 효과와 정책고려사항. 한국습지학회지, 20(4), 304-313.
14. 김종구, 장효상, 2014. 천수만 해저 퇴적물의 입도특성 및 중금속 오염도 평가 - 어장해역과 비어장해역의 퇴적환경 비교-. 해양환경안전학회지 20(4), 358-371.
15. 김학관, 경지 및 도시 불투수면을 고려한 유역 수문·수질 모델링. 서울대학교 박사학위논문.

16. 나은혜, 신창민, 박란주, 김덕길, 김경현, 2014. 실시간 낙동강 흐름 예측을 위한 유역 및 수체 모델 결합 적용 연구. 한국물환경학회지 30(1), 16-24.
17. 남원호, 2013. 확률론 기반 농업용 저수지의 용수공급 지속가능성 및 운용성 평가. 서울대학교 박사학위논문.
18. 노재경, 이재남, 2013. 유출해석 적용을 위한 농업용수 수요량의 적합성 평가. 한국농공학회지: 전원과 자원 55(2), 10-15.
19. 노희진, 2011. Water Quality Modeling Using SWAT and EFCE-WASP in Doam Reservoir. 인제대학교 박사학위논문.
20. 노희진, 김정민, 김영도, 강부식. 2013. 유역유출 변화에 따른 도암댐 저수지 수질 영향 예측. 대한토목학회논문집 33(3), 975-985.
21. 농업기반공사, 2004. 간척지 조성 후 토양특성 변화 및 활용방안 연구.
22. 문영훈, 권영립, 안병구, 김대향, 한성수, 2011. 간척지 토양에서 퇴비처리가 벼의 생산 및 품질개선에 미치는 영향. 한국토양비료학회지 44(5), 808-813.
23. 박재충, 최재훈, 송영일, 송상진, 서동일, 2010. HSPF, EFDC 및 WASP에 의한 영주다목적댐 저수지의 수질예측. 환경영향평가 19(5), 465-473.
24. 박진현, 고재한, 조영준, 정경훈, 성무홍, 정형모, 박현규, 유승환, 윤광식, 2018. 회복탄력성을 고려한 기상 시나리오별 가뭄 용수 공급방안: 나주호를 중심으로. 한국농공학회논문집 60(5), 115-124.
25. 박흥식, 임현식, 홍재상, 2000. 천수만 조하대 연성저질의 저서환경과 저서동물 군집의 시·공간적 양상. 한국수산과학회지 33(3), 262-271.
26. 배요섭, 남귀숙, 2008. 농업용저수지의 수질개선을 위한 오염물질 침강지 조성 기법. 한국습지학회지 10(3), 79-86.
27. 백남현, 조광민, 이장희, 양창휴, 신평, 이상복, 최민규, 이정보, 박기훈, 2013. 신간척지에서 질소시비량과 파종량이 청보리의 생육특성 및 수량에 미치는 영향. 한국국제농업개발학회지 25(4), 412-416.
28. 서승원, 김정훈, 유시홍, 2002. 배수갑문을 통해 부분 개방된 하구호에서의 순환과 수질모의. 한국해양해양공학학회논문집 14(2), 136-150.
29. 서명교, 이상현, 서정호, 2014. 회야호 부영양화 평가 및 준설에 의한 수질개선 효과 분석 연구. 한국산학기술학회 논문지 15(11), 6943-6951.
30. 성충현, 2014. HSPF 모형과 호소 물수지를 이용한 미계측 간척 담수화호 수문모델링. 한국농공학회논문집 56(6), 129-137.
31. 성충현, 황세운, 오찬성, 조재필, 2017. 오염원 산정단위 수준의 소유역 세분화를 고려한 새만금유역 수문·수질모델링 적용성 검토. 한국농공학회 59: 83-96.

32. 송민경, 2007. 간월호 표층 퇴적물에 함유된 인의 존재형태 및 용출 특성에 관한 연구. 강원대학교 석사학위논문.
33. 송윤호, 최만식, 안윤우, 2011. 천수만 퇴적물에서 미량금속의 지화학적 특성. 한국해양학회지: 바다 16(4), 169-179.
34. 송인홍, 성충현, 2016. 갈수기에 하구 담수호의 수질 대책 수립의 필요성. 한국농공학회지: 전원과 자원 58(4), 44-51.
35. 이은정, 2011. SWAT 모형과 무제약 조건 최적화를 이용한 유역 비점오염원 관리. 서울대학교 박사학위논문.
36. 성충현, 황세운, 오찬성, 조재필, 2017. 오염원 산정단위 수준의 소유역 세분화를 고려한새만금유역 수문·수질모델링 적용성 검토. 한국농공학회논문집, 59(3), 83-96.
37. 신금진, 김태근, 2019. 유역모형을 이용한 새만금 유역의 TOC 유출량 산정. 한국환경기술학회지, 20(1), 48-59.
38. 신민환, 최중대, 2015. 새만금 유역 발의 비점오염물질 최적관리기법 개발. 한국농공학회지, 57(1), 30-38.
39. 신섿별, 황순호, 허용구, 송정현, 김학관, 강문성, 2018. SWAT-EFDC 연계 모델링을 통한 입장저수지의 유사 해석. 한국농공학회논문집 60(3), 135-148.
40. 신유리, 정지연, 최정훈, 정광욱, 2012. HSPF-EFDC를 이용한 새만금호와 유역의 수리 변화 모의. 한국물환경학회지 28(3), 384-393.
41. 신재순, 이승현, 김원호, 윤세형, 김종근, 남진우, 2005. 간척지에서 주요 겨울사료작물의 건물생산성 및 사료가치 비교. 한국초지조사료학회지 25(2), 113-118.
42. 심명필, 2000. 수자원사업 예비타당성조사의 방법론과 지침 연구. 한국수자원학회논문집. 33(S), 447-452.
43. 안재환, 김미경, 이미경, 황병기, 2005. 퇴적물 준설에 따른 수환경 영향 예측 모의. 대한환경공학회지 27(11), 1228-1237.
44. 양창휴, 김선, 이장희, 백남현, 김택겸, 최원영, 이경보, 2012. 새만금간척지 사료작물 재배시 질소증비 효과. 한국토양비료학회지, 45(2), 235-240.
45. 오희상, 이한필, 2017. 유역-호소 통합수질예측 기법을 이용한 물왕저수지 수질개선효과 분석. 한국농공학회논문집 59(3), 51-62.
46. 우한준, 최재웅, 유주형, 최송화, 김성렬, 2005. 천수만 황도 갯벌의 퇴적환경. 한국습지학회지 7(2), 53-57.
47. 윤춘경, 함중화, 2000. SWMM 과 WASP5 모형을 사용한 하구담수호의 수질 예측. 한국환경농학회지 19(3), 252-258.

48. 이광야, 김해도, 최경숙, 남효석, 홍민, 손중화, 2008. 청정 시설용수 공급을 위한 FDA 시스템 개발, 농업생활과학연구 42(3), 35-42.
49. 이남주, 류시완, 신찬기, 2006. 수문운영을 통한 정체수역 수질개선에 관한 연구. 한국수처리학회지 14(4), 69-76.
50. 이동관, 김기현, 이재성, 2016. 간척지 내 부영양화된 호수 수괴의 간헐적 유출로 인한 천수만 저층수의 Hypoxia 발생과 영양염 분포 특성. 해양환경안전학회지 22(7), 854-862.
51. 이영기, 황상철, 황현동, 나진영, 유나영, 이한진, 2018, HSPF-EFDC 모델을 연계한 홍수조절댐 수질 변화 예측. 환경영향평가 27(3), 251-266.
52. 이진희, 박미숙, 2012. 새만금호 수질개선을 위한 유입부 침전지 및 인처리 시설 사례 조사. 한국수자원학회지: 물과 미래 45(10), 34-41.
53. 이태원, 1996. 천수만 어류의 종조성 변화: 1.저어류. 한국수산과학회지 29(1), 71-83.
54. 이형주, 2001. 수자원의 효율적 이용을 위한 서남해안 하구담수호의 수질변화 고찰. 건국대학교 석사학위논문.
55. 임경호, 이영신, 김이형, 2006. 간월호 및 부남호의 유입 오염부하량 산정. 한국습지학회논문집 8(4), 33-40.
56. 임상준, 박승우, 1997. 논의 유출곡선번호 추정, 한국수자원학회 논문집 30(4), 379-387.
57. 장정렬, 이성학, 조영권, 최진용, 2014. 새만금 간척지구의 농업용지 토지이용계획을 고려한 농업용수 수요량 산정. 한국관개배수논문집 21(1), 1-16.
58. 장정렬, 신유리, 정지연, 최강원, 2011. 간척지 논 농업배수 처리에 적합한 인공습지 설계 기법. 한국관개배수논문집 18(1), 4-17.
59. 장정렬, 최선화, 권순국, 2004. 저수지 내 유입부 침강지의 수질정화 효율. 한국물환경학회지 20(5), 473-479.
60. 정광욱, 이승재, 이상우, 한정윤, 2007. 유역에서 토지이용과 오염원자료의 공간적 변화가 하천수질에 미치는 영향 분석. 생태와 환경, 40(1), 40-49.
61. 정종철, 2000. 시화호 갑문조절을 통한 수질개선 효과 분석. 한국물환경학회지 16(1), 1-8.
62. 최경숙, 이광야, 2012. 새만금 담수 활용을 위한 요구수질별 최적의 수처리 방안 연구. 농업생명과학연구 46(2), 169-178.
63. 최돈혁, 최광순, 김동섭, 김세원, 최동호, 황인서, 이윤경, 강호, 2008. 시화호 인공습지에서 시공간적 수질분포 및 오염물질 제거효율 평가. 대한환경공학회지 30(10), 1013-1020.

64. 최선화, 김홍섭, 정세웅, 2019. 바이오스톤 볼 수처리 시스템에 의한 오염물질 저감 및 저수지의 수질개선효과 산정. 환경영향평가 28(5), 471-482.
65. 최현구, 김동일, 나창환, 한건연, 2012. EFDC 모형의 낙동강 수질해석 적용성 평가. 한국수자원학회논문집, 45(7), 685-696.
66. 함중화, 윤춘경, 구원석, 김형철, 신현범, 2004. 인공습지를 이용한 하구담수호 유입하천수 수질개선 현장실험결과 분석. 한국농공학회논문집 46(5), 141-153.
67. 환경부, 2007. 환경영향예측모델 활용지침 마련을 위한 연구.
68. 황대호, 김익재, 강형식, 장재호, 최재완, 2011. 새만금유역 제2단계 수질개선 종합대책 수립. 한국수자원학회지: 물과 미래 44(7), 18-36.
69. 황순호, 신섫별, 송정현, 윤광식, 강문성, 2018. EFDC-WASP 연계모형을 이용한 소규모 농업용 저수지 비소 농도 모의. 한국농공학회논문집 60(5), 29-40.
70. Andreassian, V., Perrin, C., Michel, C., 2004. Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. J. Hydrol. 286, 19-35.
71. Arnold, J. G., & Williams, J. R., 1987. Validation of SWRRB—simulator for water resources in rural basins. Journal of Water Resources Planning and Management, 113(2), 243-256.
72. Arnold, J. G., Neitsch, S. L., and Williams, J. R., 1996. Soil and water assessment tool user's manual. USDA Agriculture Research Service, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station: TX.
73. Attoh-Okine, N.O., Cooper, T., Mensah, S.A., 2009. Formulation of Resilience Index of Urban Infrastructure Using Belief Functions, IEEE SYSTEMS JOURNAL, 3(2): 147-153.
74. Bianchi, T. S., DiMarco, S. F., Cowan Jr, J. H., Hetland, R. D., Chapman, P., Day, J. W., Allison, M. A., 2010. The science of hypoxia in the Northern Gulf of Mexico: a review. Science of the Total Environment, 408(7), 1471-1484.
75. Blumberg, A. F., and Mellor, G. L., 1987. A description of a three dimensional coastal ocean circulation model. Three dimensional coastal ocean models, 4, 1-16.
76. Bocchini, P., Frangopol, D. M., Ummenhofer, T., Zinke, T., 2014. Resilience and sustainability of civil infrastructure: Toward a unified approach. Journal of Infrastructure Systems, 20(2), 04014004.

77. Bruneau, M, Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., Rourke, T.D.O, Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K, Wallace, W.A., Winterfeldt, D.V., 2003. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra* 19: 733–752.
78. Butler, D., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., Diao, K., Astaraie-Imani, M., 2014. A new approach to urban water management: Safe and Sure. *Procedia Eng.* 89, 347–354.
79. Casulli, V., and Cheng, R. T., 1992. Semi implicit finite difference methods for three dimensional shallow water flow. *International Journal for numerical methods in fluids*, 15(6), 629–648.
80. Cerco, C. F Cole, T., 1993. Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay. *Journal of Environmental Engineering* 119(6): 1006 - 1025.
81. Chang, S.E., Shinozuka, M., 2004. Measuring Improvements in the Disaster Resilience of Communities, *Earthquake Spectra* 20: 739–755.
82. Chen, C.F., Wu, Y.R., Lin, 2019. Applying a watershed and reservoir Model in an off-site reservoir to establish an effective watershed management plan. *Processes*. 7, 484.
83. Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., Bruneau, M., 2010. Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering structures*, 32(11), 3639–3649.
84. Conley, D. J., Paerl, H. W., Howarth, R. W., Boesch, D. F., Seitzinger, S. P., Havens, K. E., Likens, G. E., 2009. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus.
85. Craig, P.M., 2009. User's Manual for EFDC_Explorer, Dynamic Solutions Intl, LLC.
86. Diaz, R. J., Rosenberg, R., 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *science*, 321(5891), 926–929.
87. DiToro, D. M., Fitzpatrick, J. J., 1993. Chesapeake bay sediment flux model, Hydroqual, Inc. Mahwah, NJ.
88. Folke, C., Carpenter, S.R., Walker, B., Scheffer, B., Chapin, T., Rockström, J., 2010. Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*. 15(4): 20.
89. Gunderson, L.H., 2000. Ecological resilience—in theory and application.

- Annu. Rev. Ecol. Syst. 31, 425-439.
90. Hamrick, J. M. and Zarillo, G., 1995, Modeling near shore circulation and sediment transport, 4th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, San Diego, CA.
 91. Hamrick, J. M. and Moustafa, M.Z., 1996. Development of the Everglades wetlands hydrodynamic model: 1. Model formulation and physical process representation. In review.
 92. Hashimoto, T., Loucks, D.P., Stedinger, J.R., 1982. Reliability, resiliency, robustness, and vulnerability criteria for water resource systems. *Water Resources Research*. 18(1), 14-26.
 93. He, X., Izaurralde, R. C., Vanotti, M. B., Williams, J. R., & Thomson, A. M., 2006. Simulating long-term and residual effects of nitrogen fertilization on corn yields, soil carbon sequestration, and soil nitrogen dynamics. *Journal of environmental quality*, 35(4), 1608-1619.
 94. Holling, C.S., 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 4, 1-23.
 95. Hong, J. S., & Kim, L. H., 2016. Assessment of performances of Low Impact Development (LID) facilities with vegetation. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 3(2), 100-109.
 96. Izaurralde, R. C., Williams, J. R., McGill, W. B., Rosenberg, N. J., Jakas, M. Q., 2006. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling*, 192(3-4), 362-384.
 97. Jung, C.G., Lee, D.R., Moon, J.W., 2014. Comparison of the penman monteith and regional calibration of hargreaves equation for actual evapotranspiration using SWAT-stimulated results in Seolma-Cheon watershed. *Hydrological Sciences Journal* 61(4), 1-16.
 98. Kalcic, M., ChaubeyI., FrankenbergerJ., 2015. Defining Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Hydrologic Response Units (HRUs) by Field Boundaries, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8:69-80.
 99. Kang, M., Park, S., Kwon, H., Choi, H., Choi, Y., Kim, J.. 2009. Evapotranspiration from a deciduous forest in a complex terrain and a heterogeneous farmland under monsoon climate. *Asia-Pacific Journal of*

- Atmospheric Sciences 45(2), 175 - 191.
100. Knisel, W. G., 1980. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems (No. 26). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
 101. Kjeldsen, T.R., Rosbjerg, D., 2004. Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. *Hydrological Sciences Journal*, 49(5), 755-767.
 102. Leonard, R. A., Knisel, W. G., & Still, D. A., 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1403-1418.
 103. Loucks, D.P., 1997. Quantifying trends in system sustainability, *Hydrological Sciences Journal* 42(4), 513-530.
 104. Li, T., Horton, R. M., Bader, D. A., Liu, F., Sun, Q., Kinney, P. L., 2018. Long-term projections of temperature-related mortality risks for ischemic stroke, hemorrhagic stroke, and acute ischemic heart disease under changing climate in Beijing, China, *Environment International* 112, 1-9.
 105. Liu, Z., Hashim, N.R., Kingery, W.L., Huddleston, D.H. Xia, M. 2008. Hydrodynamic Modeling of St. Louis Bay Estuary and Watershed Using EFDC and HSPF. *Journal of Coastal Research*, 52:107-116
 106. Liu, Y., Wang, R., Guo, T., Engel, B.A., Flanagan, D.C., Lee, J.G. Li, S., Pijanowski, B.C., Collingsworth, P.D., Wallace, C.W., 2019. Evaluating efficiencies and cost-effectiveness of best management practices in improving agricultural water quality using integrated SWAT and cost evaluation tool. *Journal of Hydrology* 577:123965
 107. Maier, H. R., Lence, B. J., Tolson, B. A., Foschi, R. O., 2001. First order reliability method for estimating reliability, vulnerability, and resilience. *Water Resources Research* 37(3), 779-790.
 108. Maier, H. R., Lence, B. J., Tolson, B. A., 2002. The role of reliability, vulnerability and resilience. 27th Hydrology and Water Resources Symposium, The Institution of Engineers, Australia, Melbourne, Australia, May 20-23, Proceedings on CD-ROM.
 109. McMahon, T. A., Adedoye, A. J., Zhou, S. L., 2006. Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology* 324, 359-382.

110. Mellor, G. L., Yamada, T., 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Reviews of geophysics and space physics* 20(4), 851–875.
111. Merrill, N. H., Mulvaney, K. K., Martin, D. M., Chintala, M. M., Berry, W., Gleason, T. R., Humphries, A. T., 2018. A resilience framework for chronic exposures: water quality and ecosystem services in coastal social-ecological systems. *Coastal Management* 46(4), 242–258.
112. Moriaisi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., Daggupati, P., 2015. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria, *Transactions of the ASABE* 58, 1763–1785.
113. NOAA, 2109. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/estuary.html>.
114. Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., & King, K. W., 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005. Grassland. Soil and Water Research Laboratory, Blackland Research Center, Temple, Texas.
115. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute.
116. Patil, A., Ramsankaran, R., 2017. Improving streamflow simulations and forecasting performance of SWAT model by assimilating remotely sensed soil moisture observations. *Journal of Hydrology*, 555: 683 - 696.
117. Rajib, M.A. , Merwade, V., Yu, Z., 2018. Rationale and efficacy of assimilating remotely sensed potential evapotranspiration for reduced uncertainty of hydrologic models. *Water Resour. Res.* 54(7), 4615–4637.
118. Roberts, A. D. and S. D. Prince, 2010. Effects of urban and non-urban land cover on nitrogen and phosphorus runoff to Chesapeake Bay. *Ecological indicators* 10(2): pp. 459–474.
119. Rose, A., 2007. Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions. *Environmental Hazards* 7(4), 383–398.
120. Shenk, G. W., J. Wu, and L. C. Linker, 2012. Enhanced HSPF model structure for Chesapeake Bay Watershed simulation. *Journal of Environmental Engineering*, 138(9): 949–957.
121. Simonovic, S. P., Arunkumar, R., 2016. Quantification of resilience to

- water scarcity, a dynamic measure in time and space. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 373, 13-17.
122. Sisson, G. M., Z. Jin, C. Lee, J. Shen, and J. J. Jia, 2007. Developing a cost-effective methodology to manage fecal coliform loading in shellfish harvesting areas of upper Chesapeake Bay, Maryland, *Estuarine and Coastal Modeling* 2007: 543-560.
 123. Stanley, D. W., Nixon, S. W., 1992. Stratification and bottom-water hypoxia in the Pamlico River estuary. *Estuaries*, 15(3), 270-281.
 124. Sun, L., Nistor, I., Seidou, O., 2015. Streamflow data assimilation in SWAT model using Extended Kalman Filter. *Journal of Hydrology*, 531: 671 - 684.
 125. Sweetapple, C., Fu, G., Butler, D., 2017. Reliable, robust, and resilient system design framework with application to wastewater-treatment plant control. *J. Environ. Eng.* 143(3): 04016086.
 126. Taleb-Berrouane, M., Khan, F., 2019. Dynamic resilience modelling of process sstems. *CHEMICAL ENGINEERING*, 77.
 127. Tech, T., 2007. The environmental fluid dynamics code theory and computation volume 3: water quality module. Technical report, Tetra Tech, Inc., Fairfax, VA.
 128. Testa, J. M., Kemp, W. M., 2014. Spatial and temporal patterns of winter - spring oxygen depletion in Chesapeake Bay bottom water. *Estuaries and coasts*, 37(6), 1432-1448.
 129. Vicente-Serrano, S.M., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Revuelto, J., Lopez-Moreno, J.I., Gonzalez-Hidalgo, J.C., Moran-Tejeda, E., Espejo, F., 2014. Reference evapotranspiration variability and trends in Spain, 1961-2011. *Glob. Planet. Chang.* 121, 26-40.
 130. Vugrin, E. D., Warren, D. E., Ehlen, M. A., 2010. A resilience assessment framework for infrastructure and economic systems: quantitative and qualitative resilience analysis of petrochemical supply chains to a hurricane. *Process Safety Progress* 30(3), 280-290.
 131. Zhang, Y., Hou, J., Gu, J., Huang, C, Li, X., 2017. SWAT-Based Hydrological Data Assimilation System (SWAT-HDAS): Description and Case Application to River Basin-Scale Hydrological Predictions. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 9, 2863 - 2882.

Abstract

Dynamic Resilience Assessment for Water Quality Management of Estuarine Reservoir using SWAT-EFDC model

Soonho Hwang

Major in Rural Systems Engineering

Department of Landscape Architecture and

Rural Systems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

An estuary is an area where the final runoff outlet of the streams and meets the marine environment with a mix of freshwater and seawater. Water resources systems of estuarine reservoir are being used for various water purposes. In particular, when it comes to agricultural water use, it is essential to supply irrigation water that

meets water quality standards for providing safe food and to make the eco-friendly freshwater lakes and reclaimed lands. Therefore, it is essential to establish water pollution control management under a comprehensive understanding of characteristics of the upstream watershed, inflow pollutants, and reservoir body.

Generally, the method for selecting the appropriate water quality improvement plan is based on optimal decision-making by considering both the assessment of the satisfaction of the target water quality criteria and the economic assessment with the annual average water quality concentration. However, it is easy to overlook the importance of the availability of reservoir water by time series because the existing method for evaluating the availability of reservoir water is only considering the target criteria satisfaction of the water quality. Therefore, in this study, the concept of resilience was adopted for evaluating water management plans and specifically, the dynamic resilience concept was used for considering the environmental changes in resilience by time for each plan.

In this study, SWAT-EFDC linkage model was used for simulating the water quality changes and evaluating the water management scenario. The Ganwol estuarine reservoir was selected as a study area, which recently has been suffered from water quality deterioration. First, in the aspect of the target criteria satisfaction of the water quality, it was found that the dredging scenario alone could not satisfy the agricultural water use criteria (1.0 mg/L) in Zone 3 due to inflow of continuous severe pollutant from the upper watershed and highly contaminated bed soil. Thus, because dredging scenarios alone had limitations, reducing the total discharge load of sewage treatment facilities located in the upstream basin outlets and

non-point source pollution management from the upper watershed are need to be considered for improving the water quality of the estuarine reservoir and establishing the effective water quality management plan.

Even though only considering the dredging scenario was not satisfied with the water quality criteria, the dredging highly contaminated bed soils of the reservoirs are closely related to the resilience of the estuarine reservoir systems in that the dredging of reservoirs can reduce internal load and enhance resistance ability from the deterioration of water quality. So, in this study, a resilience-based assessment tool was additionally considered, and both static resilience and dynamic resilience were analyzed. As a result, based on the resilience analysis results, we suggested that the dredging efficiency can be considered in the level of 60%–80% to current status due to time and economic efficiency since the resilience was not significantly different for each dredging scenario. In addition to the dredging scenario, which is a pre-active alternative, the reduction of pollutant load from waste water treatment plant, which is an reactive (adaptive) alternative, was also considered. The analysis results show that dynamic resilience can be significantly improved compared to the case of applying only preactive alternative, but the resourcefulness index is relatively low. So, efficient operation of waste water treatment plant needs to be additionally considered when the stakeholders establish the water quality management plans.

The dynamic resilience analysis method reviewed in this study was able to draw conclusions that could not be included in the existing method for evaluating water quality or static resilience analysis, which can confirm the effectiveness, utility and applicability of the

dynamic resilience-based assessment tool for the water quality management plan, improvement of water quality, and finally for establishing a sustainable water resource management system in estuarine reservoir.

keywords : Estuarine reservoir, water quality management, SWAT, EFDC, resilience, dynamic resilience
Student Number : 2012-31000